ABRIL 2008

INVESTIGACION Y CIENCIA

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN



BIOLOGIA
Microquimerismo: ¿dañino o protector?

ECOLOGIA
El castor austral en Tierra de Fuego

QUIMICA
La tabla periódica a debate

CAMBIO CLIMATICO
¿Cuánto subirá el nivel del mar?

www.investigacionyciencia.es

6,00 EUROS

INFORME ESPECIAL

EL FUTURO DE LA FISICA

- El Gran Colisionador de Hadrones
- Revolución en la física de partículas



SUMARIO

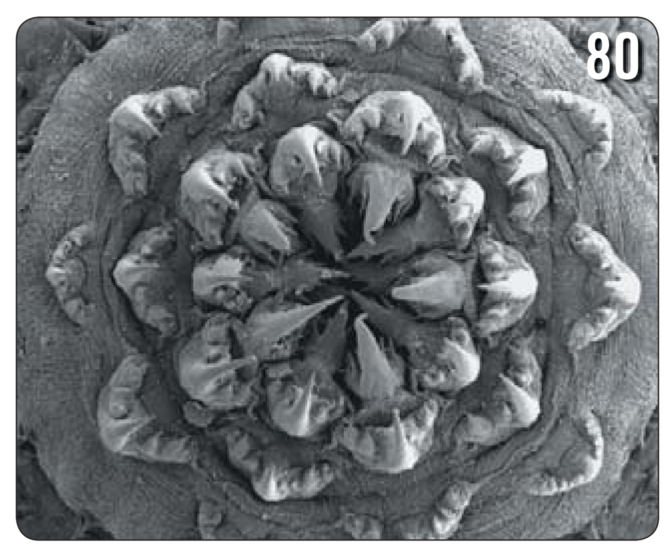
Abril de 2008/ Número 379



Las nevadas del interior de los casquetes polares originan corrientes de hielo que avanzan lentamente hacia el océano.

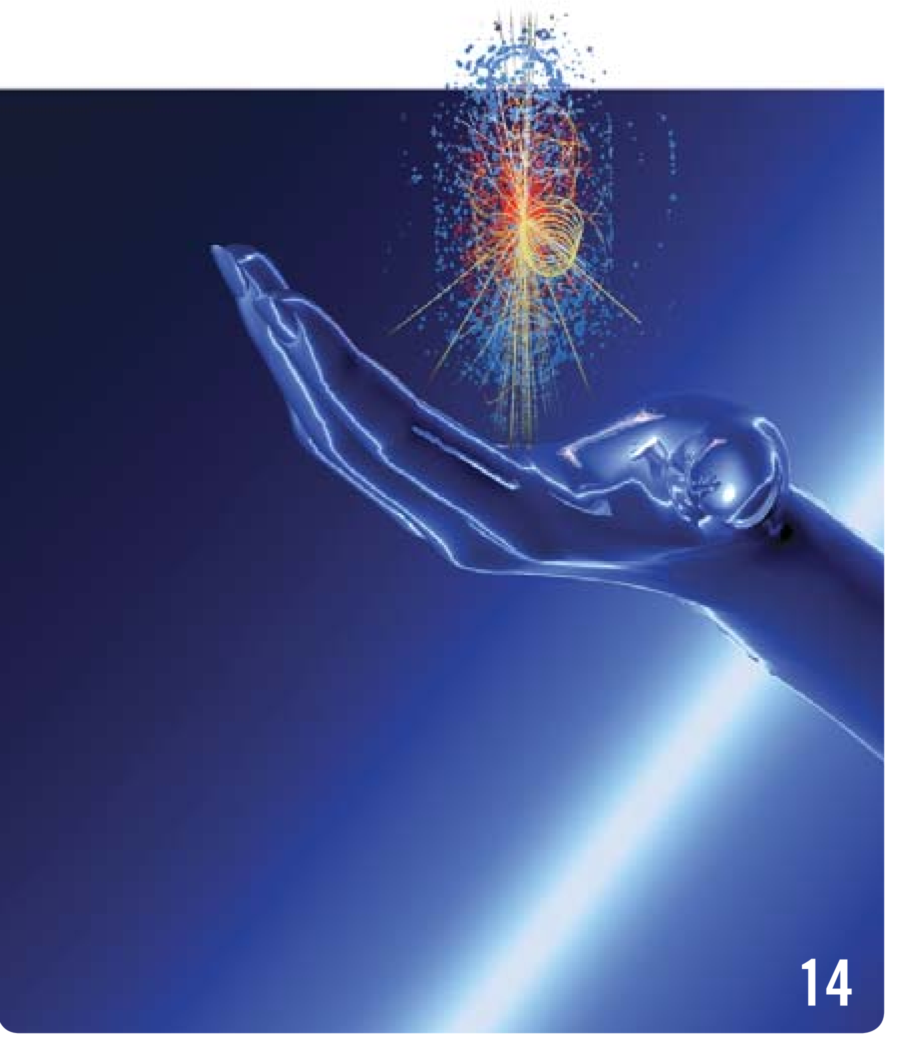


Albergamos células de individuos genéticamente distintos de nosotros.



Organos relacionados con la depredación aparecen ya en fósiles del período Cámbrico.

ARTICULOS



El Gran Colisionador de Hadrones, que muy pronto empezará a funcionar, explorará nuevas regiones de la física de partículas.



El sodio, junto con el litio y el potasio, constituyen una tríada de elementos químicos.



Los castores se han extendido por la Patagonia.

SECCIONES

INVESTIGACION Y CIENCIA

DIRECTOR GENERAL José M.ª Valderas Gallardo
DIRECTORA FINANCIERA Pilar Bronchal Garfella
EDICIONES Juan Pedro Campos Gómez
Laia Torres Casas
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón
Albert Marín Garau
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
ADMINISTRACIÓN Victoria Andrés Laiglesia
SUSCRIPCIONES Concepción Orenes Delgado
Olga Blanco Romero
EDITA Prensa Científica, S.A. Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344 Fax 934 145 413
www.investigacionyciencia.es

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR IN CHIEF John Rennie
EXECUTIVE EDITOR Mariette DiChristina
MANAGING EDITOR Ricki L. Rusting
CHIEF NEWS EDITOR Philip M. Yam
SENIOR WRITER Gary Stix
EDITORS Mark Alpert, Steven Ashley, Peter Brown, Graham P. Collins, Mark Fischetti, Steve Mirsky, George Musser y Christine Soares
CONTRIBUTING EDITORS W. Wayt Gibbs, Marguerite Holloway, Michelle Press, Michael Shermer, Sarah Simpson
ART DIRECTOR Edward Bell
PRODUCTION EDITOR Richard Hunt

CHAIRMAN Brian Napack
PRESIDENT Steven Yee
VICE PRESIDENT AND MANAGING DIRECTOR, INTERNATIONAL Dean Sanderson
VICE PRESIDENT Frances Newburg
VICE PRESIDENT, FINANCE, AND GENERAL MANAGER Michael Florek

DISTRIBUCION

para España:

LOGISTA, S. A.
Pol. Ind. Pinares Llanos
Electricistas, 3
28670 Villaviciosa de Odón (Madrid)
Teléfono 916 657 158

para los restantes países:

Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona

PUBLICIDAD

Madrid:
MMCATALAN PUBLICIDAD
M. Mercedes Catalán Rojas
Recoletos, 11 3.º D
28001 Madrid
Tel. y fax 915 759 278
Móvil 649 933 834

Cataluña:
QUERALTO COMUNICACION
Julián Queraltó
Sant Antoni M.ª Claret, 281 4.º 3.ª
08041 Barcelona
Tel. y fax 933 524 532
Móvil 629 555 703

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

Ramón Pascual: *El Gran Colisionador de Hadrones*; Luis Bou: *Revolución en la física de partículas* y *Puesta al día*; Sònia Ambròs: *Dinámica de los casquetes glaciales*; José Ramón Bertomeu Sánchez: *La tabla periódica*; I. Nadal: *Un físico con acción a distancia*; Juan M. González Mañas: *Microquimerismo*; Joandomènec Ros: *Orígenes de la diversidad biológica*; J. Vilardell: *Hace...*, *Curiosidades de la física* e *Ideas aplicadas*; Bruno Moreno: *Apuntes* y *Ciencia y sociedad*; Anna Ferran: *Ciencia y sociedad*; Marián Beltrán: *Desarrollo sostenible*



Portada: Kenn Brown

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344
Fax 934 145 413

Precios de suscripción:

	Un año	Dos años
España	65,00 euro	120,00 euro
Resto del mundo	100,00 euro	190,00 euro

Ejemplares sueltos:

El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

Difusión controlada 

ISSN 0210136X Dep. legal: B. 38.999 – 76

Imprime Rotocayfo-Quebecor, S.A. Ctra. de Caldes, km 3 - 08130 Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España

Recopilación de Daniel C. Schlenoff

...cincuenta años

Materia. «De existir en nuestra galaxia, la anti-materia no excedería del orden de una parte en 10.000.000 de la materia ordinaria. Es máximamente improbable que haya en nuestra galaxia una estrella constituida por anti-materia. Fuera de ella, en partes remotas del universo podría haber galaxias compuestas totalmente de anti-materia. Lo más parecido que tenemos a una prueba directa de la existencia de tales cuerpos es la presencia de radio-fuentes cuya energía difícilmente se explica mediante los procesos conocidos, pero que podría justificarse por la aniquilación de la anti-materia. Por otra parte, si en el universo existe realmente la anti-materia, desconocemos por ahora el modo en que el grueso de ella se separó de la materia. Explicarlo requeriría, al parecer, una revolución en nuestras ideas acerca de los problemas cosmológicos.
—Geiffrey Burbige y Fred Hoyle»

...cien años

¿Balneario Chernobil? «Relacionado con el establecimiento del gobierno austriaco dedicado a la preparación de productos de uranio, se ha construido en Joachimsthal (Bohemia) un laboratorio para tratar las sustancias radiactivas que se hallan en los residuos y los subproductos de los minerales de uranio. Se edificará también un balneario, donde el agua mineral radiactiva se aplicará a procesos curativos.»



Revistas americanas, según *Puck*, 1908.

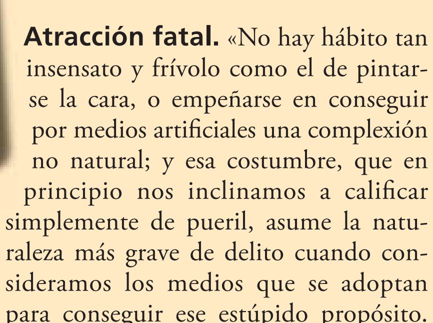
Amenaza pública. «Resulta sorprendente que la puerta giratoria no haya suscitado fuertes protestas hace tiempo, pues constituye una amenaza a la seguridad pública. Decimos esto con la debida valoración de la ingeniosidad del mecanismo y del éxito con que cumple su misión de evitar las ráfagas de aire que acompañan a las aperturas y cierres de las puertas ordinarias de bisagra. La amenaza estriba en el hecho de que las personas pueden atravesar sólo una a una los espacios giratorios de la puerta. En caso de un accidente que provocase un alud de gente hacia la puerta, los huéspedes de un hotel tardarían un tiempo interminable en salir por ella uno a uno.»

SCIENTIFIC AMERICAN, VOL. XCVIII, Nº. 16; 18 DE ABRIL DE 1908

Visto por *Puck*. «Nuestra contemporánea *Puck* ha publicado, en uno de sus últimos números, unas ilustraciones que considera caracterizan a ciertas publicaciones periódicas, SCIENTIFIC AMERICAN entre ellas. Reproducimos las ilustraciones para deleite de los lectores de SCIENTIFIC AMERICAN que deseen verse a sí mismos tal como los ve *Puck*. El caballero en mangas de camisa, de semblante acalorado, absorto y sudoroso no corresponde a la idea que nosotros tenemos de nuestro lector ideal; pero su actividad frenética tiene nuestra máxima aprobación.»

...ciento cincuenta años

Caballos salvajes. «Se han formulado toda clase de teorías acerca del peculiar método de domeñar el espíritu salvaje de los caballos que tan acertadamente aplica el señor Rarey, generalmente conocido como el ‘domador de caballos americano’. Es bien sabido que los animales poseen una pasión casi instintiva por ciertos olores, que parecen obrar sobre ellos una influencia apaciguadora. Rarey ha insinuado que su poder sobre los caballos lo logra exclusivamente a través de unas hierbas o drogas que actúan sobre los sentidos del olfato y el gusto. Tenemos entendido que el señor Rarey ha sido desafiado por D. Sullivan, también domador de caballos (nieto del famoso Sullivan, el Susurrador), a una prueba de sus poderes en Cork (Irlanda).»



Atracción fatal. «No hay hábito tan insensato y frívolo como el de pintarse la cara, o empeñarse en conseguir por medios artificiales una complexión no natural; y esa costumbre, que en principio nos inclinamos a calificar simplemente de pueril, asume la naturaleza más grave de delito cuando consideramos los medios que se adoptan para conseguir ese estúpido propósito. Por ejemplo: para adquirir un aspecto saludable, unos labios de rubí y unas formas carnosas se emplea arsénico en grandes cantidades. El bismuto y el antimonio se emplean también en abundancia en la manufactura de cosméticos, sin los cuales las damas no se consideran presentables del todo. Diríamos que algunas damas reparten entre sus admiradores unas miradas real y figurativamente *fatales*.»

Cartas al Director
Ante las preguntas formuladas por algunos lectores a propósito de la carta al director del mes pasado, la revista desea aclarar que las opiniones allí vertidas son exclusivas del firmante. Al propio tiempo, anima a los lectores a tomar parte activa en una sección que nos gustaría tuviera continuidad, rigor e interés.
—La redacción

¿Qué ha sido de ...?

Recopilación de Philip Yam

Revisión a la baja

El número de personas que, en todo el mundo, son portadoras de VIH o padecen sida ha disminuido de una forma impresionante. Ello no se debe a una reducción de la carga viral sino a la aplicación en la India de métodos de recuento más refinados. El programa conjunto de Naciones Unidas y la Organización Mundial de la Salud para el VIH/Sida (UNAIDS) anunció en noviembre de 2007 que la enfermedad afecta en India a unos 2,5 millones de personas, una reducción de más del 50 por ciento con respecto a una estimación anterior, que era de 5,7 millones. Un comentario publicado en *Lancet* el 1 de diciembre de 2007 explica que las cifras oficiales anteriores se habían obtenido por extrapolación de datos procedentes de grandes hospitales públicos. Las cifras ahora publicadas se basan en una encuesta nacional sobre 102.000 adultos; corroboran valores anteriores deducidos de una muestra de menor tamaño. En consecuencia, la India no tendrá que dedicar tantos recursos a la lucha contra el VIH; tampoco sufrirá las tasas de infección del Africa subsahariana. Los valores obtenidos respaldan, además, la estrategia de prevención que aplica el gobierno actual, orientada hacia grupos de riesgo, caso de las personas que viven de la prostitución.

Gripe en el frío

La gripe se propaga más rápidamente en invierno, pero ni las aglomeraciones humanas ni las ventanas cerradas tienen que ver con su estacionalidad. Según parece, es la combinación de aire frío y humedad relativa baja lo que contribuye a su difusión. Se ha observado que cobayas infectados y mantenidos a 5 °C daban cobijo al virus durante 40 horas más que los mantenidos a temperatura ambiente (unos 20 °C). El virus mostraba máxima estabilidad con una humedad relativa del 20 al 40 por ciento; en el aire seco, las gotículas de agua, vectores del virus, presentan un tamaño menor y permanecen en el aire durante mayor tiempo. Además, cuando hace frío, los cilios del sistema respiratorio trabajan más lentamente, lo que facilita la difusión de los virus por el tracto respiratorio y su dispersión por el aire al toser o estornudar. El estudio se ha publicado en *PLoS Pathogenes* de 13 de octubre de 2007.



Evaluación final

El Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (PICC) emitió su cuarto y definitivo informe el 17 de noviembre de 2007. Se han condensado en él tres informes anteriores, dedicados a la ciencia del cambio climático, las formas en que el mundo podría adaptarse y las estrategias de mitigación [*véase* "El fundamento físico del cambio climático," en INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, octubre de 2007]. Destaca en esa síntesis el lenguaje, más alarmista y apremiante. En él se afirma la "peligrosa interferencia antropogénica en el sistema climático" y se subraya que "el retraso en la reducción de emisiones" incrementa el riesgo de efectos de mayor gravedad. Dicha urgencia no aparecía en evaluaciones pasadas, debido a la oposición de delegados políticos. Sostienen con sus manos el informe Rajendra Pachauri (*izquierda*), presidente del PICC, y Ban Ki-moon, secretario general de las Naciones Unidas.

Fractales fracturados

Para certificar obras de arte de Jackson Pollock se ha utilizado una técnica que extrae ciertas pautas geométricas que, según se cree, empapan las salpicaduras con que firma sus pinturas de goteo [*véase* "Orden en el caos de Pollock," en INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, febrero de 2003]. La técnica mencionada se funda en los fractales, figuras que ofrecen el mismo aspecto cualquiera que sea la escala a la que se examinen, como se aprecia en el "conjunto de Julia" de la derecha (Gaston Julia fue un matemático francés). La veracidad del método fue cuestionada por físicos de la Universidad Case Western Reserve en 2006; argüían que los fractales presuntamente exclusivos de Pollock se detectaron también en trabajos de aficionados. Su ataque prosigue en un artículo no publicado todavía, donde indican que algunos *pollocks* genuinos no pasaron la prueba, la cual sí superaron, en cambio, trabajos que imitaban la técnica de aquél.

Richard P. Taylor, de la Universidad de Oregón, artífice de la técnica de análisis fractal, proclama que el equipo de Case Western la ha aplicado de forma indebida. Afirma que su método debe utilizarse juntamente con otras técnicas de verificación, como el análisis de materiales. Taylor ha examinado seis de un total de 32 obras recién descubiertas, que podrían atribuirse a Pollock; hasta el momento, ninguna de ellas ha satisfecho sus criterios matemáticos.

—Peter Sergo

C SQUARED STUDIOS *Getty Images (niño enfermo)*; GREGORY SAMS *Photo Researchers, Inc. (fractal)*; FERNANDO BUSTAMANTE *AP Photo (Reunión IPCC)*

ASTRONOMIA

La supernova más brillante podría reavivarse

Una supernova extremadamente poderosa, descubierta en el año 2006, podría estallar de nuevo. Cien veces más brillante que las supernovas comunes, SN 2006gy mantuvo toda su fuerza durante tres meses. Para explicar tal estallido masivo, los investigadores acudieron a la inestabilidad de pares, un mecanismo en el cual los rayos gamma de alta energía del interior de la estrella se convierten en pares de electrones y positrones, con lo que se drena la energía estelar que, en condiciones normales, ayudaría a mantener su presión interna. Esa pérdida provoca un colapso prematuro, que libera enormes cantidades de energía y de luz. Los astrofísicos nos informan ahora de que los cambios en el brillo de SN 2006gy se ajustan a un modelo de inestabilidad de pares pulsante. En este último caso, la implosión inicial de una estrella con una masa igual a 110 veces la del Sol desprendería una masa equivalente a la de varios soles, antes de prender el combustible de carbono y oxígeno de la estrella, y detener así temporalmente su colapso. Aproximadamente siete años después, la inestabilidad de pares provocaría un segundo colapso, que emitiría un pulso menor, aunque más rápido, de materia.



Gran explosión: Versión artística del aspecto que podría ofrecer de cerca la supernova SN 2006gy.

—J. R. Minkel

FISICA

Desde los agujeros negros

Una red terrestre de 1400 detectores de partículas y dos docenas de telescopios ha localizado un posible origen de los rayos cósmicos de más alta energía. Estos rayos —con la mayor probabilidad protones—, que viajan a una velocidad cercana a la de la luz, encierran una energía de 10^{20} electronvolt, es decir, 100 millones de veces la energía producida por los mayores aceleradores de partículas. Viene a ser la de una pelota de béisbol lanzada con fuerza. La fuente parecen ser los núcleos galácticos activos: núcleos galácticos brillantes, activados probablemente por agujeros negros supermasivos. Los cosmólogos afirman que nunca habrían podido adivinar que los agujeros negros adquirieran tal potencia de no ser por los rayos cósmicos de alta energía.

CO_2

Mares refrigerantes

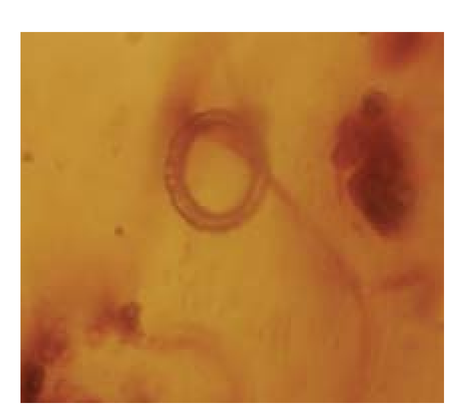
Los seres humanos podrían aumentar la capacidad de los mares de absorber dióxido de carbono del aire. Kurt House, de la Universidad de Harvard, y sus colaboradores proponen la construcción de centrales costeras de tratamiento que tomen el agua del mar y hagan pasar corrientes eléctricas a través de la misma para extraer ácido. Este proceso aumentaría la alcalinidad del agua del mar e incrementaría su capacidad natural de absorber CO_2 atmosférico. Los silicatos de las rocas volcánicas podrían neutralizar el ácido. Una centena de dichas centrales reduciría la cantidad de dióxido de carbono incorporada a la atmósfera cada año en un 15 por ciento, afirman los investigadores, pero advierten de que el agua del mar con un nivel elevado de alcalinidad podría acabar con la vida marina en la vecindad de las centrales.

—Charles Q. Choi

BIOLOGIA

El origen de los hongos carnívoros

El hongo carnívoro más antiguo que se conoce, descubierto en el interior de una pieza de ámbar de 100 millones de años de antigüedad, cazaba gusanos con aros pegajosos. Los hongos carnívoros actuales disponen de anillos constrictores y otras proyecciones para atrapar a sus presas, pero no se sabía cuándo habían aparecido esas estructuras en el proceso evolutivo. Ese ámbar de lo que fue una vez una selva tropical en la costa sudoeste de Francia encierra hongos fósiles junto con los nemátodos que constituían su presa. Los hongos poseían filamentos ramificados adornados con pequeños aros cubiertos de partículas, lo que da a entender que eran pegajosos. Algunos de los gusanos se encontraron cerca de los anillos y su anchura es similar, a grandes rasgos, señal de la depredación de nemátodos. Una vez atrapados, los gusanos eran devorados con enjambres de filamentos, según sostienen biólogos de la Universidad Humboldt de Berlín y otras instituciones. Los hongos carnívoros tendrían pues, un origen muy antiguo.



Aro pegajoso con el que un hongo carnívoro capturaba sus presas, preservado en ámbar.

—Charles Q. Choi

NASA/CXC/M. WEISS (*ilustración*), NASA/CXC/U.C. BERKELEY/N. SMITH ET AL. (*rayos X*), LICK/U. C. BERKELEY/J. BLOOM Y C. HANSEN (*infrarrojo/supernova*); SCIENCE/AAAS (*aro*)

MATERIA

Flujo persistente

Cerca del cero absoluto, varios estados exóticos de la materia pueden fluir sin fricción. Se sabe, aunque nunca se ha conseguido observarlo, que en teoría es posible obtener flujos incesantes en un condensado de Bose-Einstein, un conjunto de partículas ultrafrías que, en esencia, se comportan como una sola superpartícula. Ahora, un grupo de investigadores del Instituto Nacional de Pesos y Medidas ha creado un condensado con forma de rosquilla y flujos circulares persistentes superfluidos de hasta diez segundos de duración. A diferencia de condensados anteriores, que adoptaban formas esféricas o de cigarro puro, la forma de rosquilla estabiliza esos flujos persistentes, porque se necesitaría demasiada energía para que el agujero central se desplazase y perturbase el resto del condensado. Estos hallazgos podrían permitir avanzar en el conocimiento de la superfluidez y llevar a la creación de giroscopios especialmente precisos.

Autopista en forma de rosquilla: Los átomos se mueven principalmente dentro del anillo rojo; no pueden escalar el pico de energía del centro.

Las partículas en sólidos ultrafríos podrían generar flujos sin fricción, pero algunos físicos ponen en duda que las observaciones realizadas de dicha "supersolidez" sean auténticas. Se ha observado que el helio adquiere mayor rigidez a medida que la temperatura se aproxima al cero absoluto. Este fenómeno podría reproducir los efectos de supersolidez de experimentos anteriores o indicar una propiedad de supersolidez enteramente nueva. Para resolver este misterio, será necesario realizar más experimentos.

—Charles Q. Choi

PESQUERIAS

Reducir la pesca para aumentar la ganancia

El afán desenfrenado de lucro que nos ha llevado a esquilmar los caladeros mundiales podría también salvarlos de su extinción. Tras revisar cuatro pesquerías, un grupo de economistas de la Universidad Nacional de Canberra y de la Universidad de Washington ha llegado a la conclusión de que una reducción a corto plazo de las capturas aumenta los beneficios a largo plazo. La causa: a mayor abundancia de peces, menos cuesta su captura. Siempre que se cumpla la condición de los pescadores que reducen sus capturas para permitir que se recuperen los caladeros tienen que ser las mismas que se beneficien de la reducción en los costes de la pesca, lo que implica algún tipo de acceso exclusivo. Por la misma razón, aquellos que no están pescando ahora porque no resulta rentable hacerlo, tampoco deberían tener acceso después. Un sistema de "cuotas individuales transferibles" permitiría que los pescadores compartiesen las capturas totales permitidas, sugieren los economistas. Los responsables de pesquerías de Alaska y Nueva Zelanda han empleado ese sistema con resultados positivos.

—David Biello

PERCEPCION

Según el cerebro con que se mira

Las personas que sufren de trastorno dismórfico corporal se perciben a sí mismas feas; las obsesionan ligeras anomalías o defectos imaginarios. Esta dolencia puede llevarlos a someterse a cirugía estética repetidas veces y supone un aumento del riesgo de suicidio. Es posible que esta imagen distorsionada de su propio aspecto no esté provocada sólo por la importancia que se le da a la apariencia en nuestra sociedad, sino por un defecto cerebral de la visión que hace, entiéndase al pie de la letra, que la gente vea las cosas de otra manera. Un grupo de investigadores de la Universidad de California en Los Angeles pidió a 12 pacientes que se pusieran unas gafas que mostraban imágenes digitales de rostros. Estas imágenes eran, según los casos, fotografías sin modificar, esbozos de rostros o imágenes con pecas, arrugas o detalles faciales borrosos. La resonancia magnética funcional reveló que las personas con trastorno dismórfico utilizan la parte izquierda de su cerebro, es decir, la parte vinculada a los detalles complejos, más a menudo de lo normal. Estos datos podrían ayudar a adiestrar al cerebro para que perciba los rostros de forma más precisa.

—Charles Q. Choi

PLANETAS

Gemelos no idénticos

El satélite orbital Venus Express de la Agencia Europea Espacial ha revelado cuán difiere de la Tierra su planeta gemelo. La atmósfera de Venus, que no cuenta con la protección de un campo magnético, sufre poderosos vientos solares que desgarran las moléculas y las despiden al espacio. Se ha descubierto que Venus emite el doble de hidrógeno que de oxígeno, lo cual sugiere que el planeta está perdiendo agua. Según los datos obtenidos, ha abandonado el planeta, desde que éste se formó, el agua que llenaría un océano. El satélite orbital ha confirmado también que la atmósfera de Venus produce sus propios rayos.

—Nikhil Swaminathan

INSTITUTO NACIONAL DE ESTANDARES Y TECNOLOGIA (*arriba*); GETTY IMAGES (*abajo a la izquierda*); NASA (*Venus*)

Crisis presupuestaria en las altas energías

En este 2008, ILC y NOvA, proyectos de instalaciones clave para el futuro de la física de partículas, sufren graves recortes económicos. Es de esperar que el dinero vuelva a fluir en 2009

En los últimos años, los laboratorios de investigación públicos de los Estados Unidos han proyectado un ambicioso programa de investigaciones en el campo de la física de partículas. Unos 170 científicos e ingenieros del Laboratorio Acelerador Nacional Fermi en Batavia, Illinois, han venido desarrollando diseños y técnicas para el Colisionador Lineal Internacional (ILC), que exploraría las fronteras de la física de altas energías estrellando electrones contra sus contrarios de antimateria, los positrones [*véase* "El próximo Colisionador Lineal", por Barry Barish, Nicholas Walter y Hitoshi Yamamoto, en este mismo número]. Otros 80 investigadores del Laboratorio Fermi han estado ultimando los planes para el NOvA, un detector gigantesco, en el norte de Minnesota, que podría responder preguntas fundamentales sobre el neutrino. Sin embargo, el 17 de diciembre de 2007, una fecha que los científicos no tardaron en apodar "Lunes Negro", el Congreso anuló inesperadamente la financiación del ILC y del NOvA, poniendo en peligro el futuro de la física de partículas en el país.

Lo que hizo tan sorprendentes estos recortes fue que el presidente George W. Bush y el Congreso habían prometido a comienzos del año 2007 una subida presupuestaria sustancial para las ciencias físicas. Sin embargo, en las prisas por reducir los gastos presupuestados para el año 2008 lo suficiente como para evitar un veto presidencial, los líderes parlamentarios eliminaron 88 millones de dólares del presupuesto del departamento de energía estadounidense para la física de altas energías. El presupuesto para el 2008 del Laboratorio Fermi se recortó de 372 millones de dólares a 320 millones. Además de reducir o suprimir los fondos del ILC y el NOvA, el Congreso estadounidense eliminó la contribución de 160 millones de dólares para el ITER, el proyecto internacional de reactor experimental de fusión.

El director del Laboratorio Fermi, Pier Oddone, anunció que el laboratorio se vería obligado a despedir a 200 trabajadores, es decir, en torno a un 10 por ciento del total, y que los investigadores restantes perderían dos días del sueldo mensual. Estas medidas permitirían que siguiera funcionando el Tevatrón, el exitoso colisionador protón-antiprotón del laboratorio. Se esperaba que el ILC y NOvA se convirtieran en los principales elementos de investigación en el Laboratorio Fermi, después del cierre del Tevatrón, que debe producirse antes de 2010, pero ahora los investigadores de esos proyectos deberán ser asignados a otros empeños o despedidos. "Lo más afectado es el futuro del laboratorio", afirma Oddone. "Ya no podemos continuar desarrollándolo".



Módulos de enfriamiento para la conducción del haz del ILC, en DESY (Hamburgo).

DESY

Una gran parte de ese futuro previsto consiste en el ILC. Los físicos norteamericanos se habían colocado a la cabeza de la investigación internacional sobre el desarrollo del colisionador. Tan drástico recorte de la financiación reduce, empero, la probabilidad de que ese dispositivo se construya en territorio de los Estados Unidos. "El ILC seguirá adelante, pero los Estados Unidos se quedarán atrás", afirma Barry Barish, director de la colaboración mundial constituida para la creación del colisionador.

El proyecto NOvA se halla en fase más avanzada que el ILC; antes de que se anunciara el recorte presupuestario, los directores del programa habían planeado mejorar las carreteras hasta su emplazamiento en Minnesota esta primavera, para poder empezar a trasladar los materiales de construcción de su enorme detector de neutrinos, que pesará 15.000 toneladas una vez terminado. Hay neutrinos de tres sabores, electrón, muon y tau, y oscilan constantemente de un sabor a otro; al detector NOvA le cumple la función de medir cuántos neutrinos muónicos generados en el Laboratorio Fermi se han transformado en neutrinos electrónicos cuando alcancen el norte de Minnesota. Los resultados podrían revelar la respuesta de un antiguo misterio: por qué es la materia y no la antimateria la que domina nuestro universo.

Aunque el NOvA no ha sido cancelado, la suspensión de la financiación podría hacer que algunos de sus científicos abandonasen el proyecto. "La cuestión es si se puede dejar un proyecto en el trastero durante un año y luego recuperarlo", afirma Mark Messier, de la

Universidad de Indiana, un portavoz del NOvA. “El mensaje que transmite esta situación es: marchaos a investigar a otro sitio”.

Mark Alpert

Nota de la redacción: El 4 de febrero, George Bush hizo público el proyecto de presupuesto de Estados Unidos para el año fiscal 2009. En él se incluyen aumentos considerables de los fondos dedicados a la investigación científica y, en concreto, a la física de altas energías. Al Fermilab le corresponden 379 millones de dólares. Al ITER, más de doscientos millones, por los sólo diez millones con que al final se le dotó para 2008. A NOvA, que se quedó sin nada en el presupuesto final de 2008, se le asignan 37 millones de dólares (por sólo unos 8 en 2007), con la intención de que esté funcionado en 2013. El ILC no recibiría los 60 millones de dólares que el presupuesto original de 2008 le asignaba antes del recorte en el Congreso, que los dejó en 15 millones, sino sólo 35 (por 42 millones en 2007). Esos fondos se concentrarían en áreas donde “la experiencia de Estados Unidos es única”: el anteproyecto de presupuesto cita ahí fuentes de electrones, anillos amortiguadores, dinámica y entrega de haces, equipo de radiofrecuencia y criomódulos. Ha de tenerse en cuenta que se trata sólo de un anteproyecto de un gobierno que en 2009 habrá cambiado ya. Según Barish, si la propuesta saliese adelante, significaría que Estados Unidos seguiría siendo un patrocinador importante del ILC, pero “con un programa más selectivo”.

Por otra parte, el Reino Unido, también a finales de 2007, tomó una decisión más drástica: retirarse por completo del proyecto del ILC, como consecuencia de las penurias presupuestarias del Consejo de Instalaciones Científicas y Técnicas.

¿Existe el fluido pluscuamperfecto?

Se desconoce un fluido de menor viscosidad que su densidad de entropía dividida por 4π; los teóricos conjeturan que se trata de una cota universal

La fluidez de una sustancia se caracteriza mediante la viscosidad. Esta magnitud física se representa con la letra griega η. En justa coherencia, un fluido perfecto sería aquel con η igual a cero. Con otras palabras: dos capas contiguas de un mismo fluido se deslizarían entre sí sin rozamiento mutuo.

En la dinámica de fluidos definimos ciertos números puros, es decir, carentes de dimensiones físicas, que resultan de productos y cocientes de determinadas magnitudes dinámicas. En situaciones físicas muy diferentes, los números en cuestión, si toman el mismo valor, evolucionarán de modo semejante. Por ello, podemos simular en canales y túneles de viento el comportamiento de buques y aeronaves.

Dos de los más famosos de estos números son el de Reynolds y el de Prandtl. Recientemente ha cobrado particular interés otro, que denominaremos KSS. Cuando las constantes de Boltzmann y de Planck resultan iguales a la unidad, el número KSS = η/s, donde s es la entropía por unidad de volumen del fluido. La entropía de un sistema en cierto estado global es proporcional al número de configuraciones microscópicas que producen dicho estado.

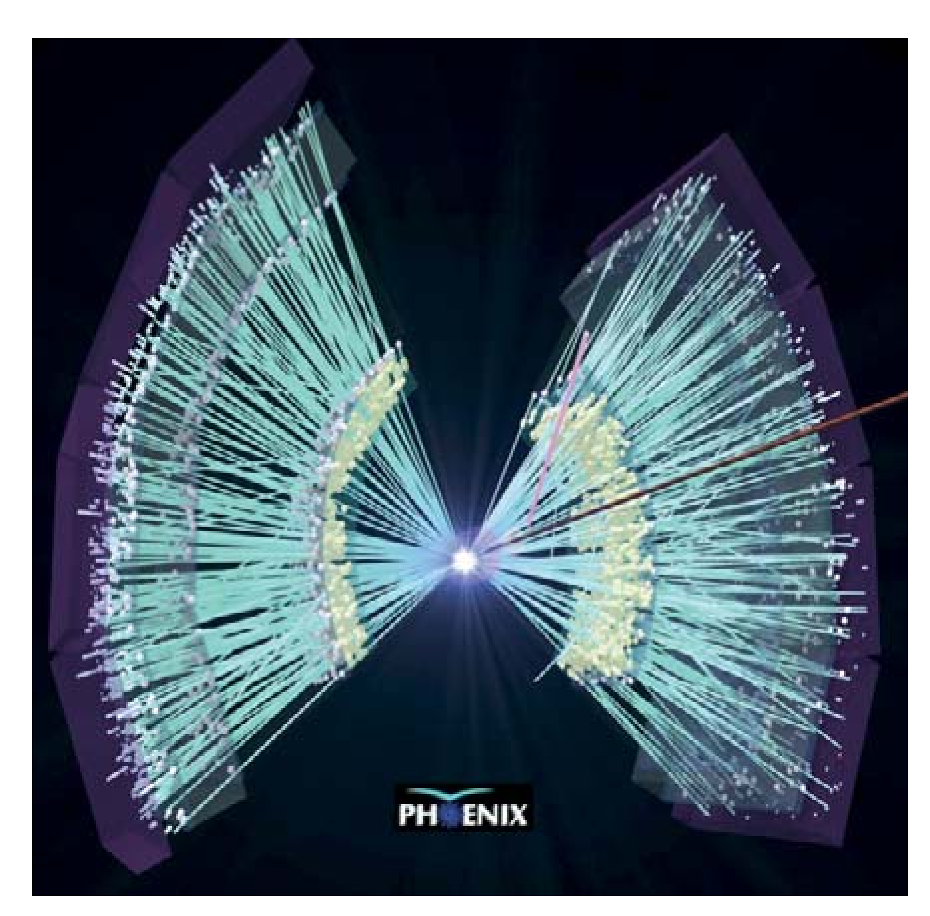
El interés por ese número KSS viene en gran medida de la conjetura de Kovtun, Son y Starinets. Afirma la conjetura que, para una clase general de fluidos, está acotado inferiormente por KSS > $1/4\pi$. La conjetura se basa en ciertas teorías cuánticas de campo relativistas, como las que se utilizan habitualmente para describir la física de las partículas elementales, aunque con un grado muchísimo mayor de simetría, o supersimetría. En tales teorías cuánticas, se tiene que, en un cierto límite, KSS = $1/4\pi$.

La importancia concedida a los trabajos de Kovtun, Son y Starinets viene avalada por las recientes observaciones realizadas en el colisionador de iones pesados RHIC, del Laboratorio Nacional de Brookhaven; en ellas se ha comprobado que, a grandes densidades y temperaturas, la materia hadrónica, o más exactamente el plasma de quarks y gluones que, según se cree, se forma en las colisiones de iones pesados, se comporta como un fluido con un valor del parámetro KSS próximo a $1/4\pi$, mucho menor del que se esperaba.

Resulta, sin embargo, aún más sorprendente que, para obtener sus resultados, Kovtun, Son y Starinets se valiesen de la teoría de supercuerdas. Dicha teoría, que lleva desarrollándose varias décadas, se propone describir todas las interacciones conocidas, gravitación incluida, teniendo en cuenta los efectos cuánticos y relativistas. En particular, muchos físicos teóricos persiguen entender el comportamiento cuántico de los agujeros negros mediante la teoría de supercuerdas. Una de las características más extrañas de ese comportamiento es la analogía que guarda con las leyes de la termodinámica, como fue puesto de manifiesto hace tiempo por Jacob D. Bekenstein y Stephen Hawking.

Kovtun, Son y Starinets han descubierto que las propiedades de una especie de agujeros negros, las branas negras (la palabra brana generaliza en muchas dimensiones la noción ordinaria de membrana bidimensional), definidos en los espacios con dimensiones adicionales que aparecen de forma natural en la teoría de supercuerdas, presentan propiedades análogas a las leyes de la hidrodinámica. Este hecho sorprendente les ha permitido obtener, entre otras cosas, el resultado antes mencionado. Javier Mas, de la Universidad de Santiago de Compostela, ha deducido recientemente otras importantes ampliaciones de la idea.

Hasta la fecha, ningún sistema conocido, sea un gas ordinario o un fluido en condiciones extremas (verbigracia, un condensado atómico o el plasma de quarks y gluones resultante de una colisión de iones pesados a gran energía), presenta menor viscosidad que su densidad de entropía dividida por 4π. Esa comprobación aporta respaldo experimental a la conjetura antes mencionada de que ningún fluido de un solo com-



Reconstrucción de una colisión de dos iones pesados en el detector PHENIX. En los experimentos de Brookhaven, a partir del número de partículas —en función del ángulo de salida y tras las colisiones registradas—, se pueden determinar propiedades hidrodinámicas del fluido en expansión creado en el instante del impacto. El cociente viscosidad/entropía así obtenido parece ser el más bajo conocido.

CORTESIA DEL LABORATORIO NACIONAL DE EE.UU. EN BROOKHAVEN, RHIC-PHENIX

ponente, describible por una teoría cuántica de campos, tiene una viscosidad inferior a la cota antedicha.

Para entender el caso de un gas de un solo componente, basta con estudiar un sencillo ejemplo de un gas ordinario, enrarecido, que conste de g componentes diferentes. Su densidad de entropía se obtendrá de la fórmula de Sackur-Tetrode y su viscosidad vendrá a ser, de manera aproximada, la de un gas de esferas duras. Como pusieron recientemente de manifiesto los autores de esta nota, el número KSS de tal sistema puede hacerse tan pequeño como se quiera, a condición de aumentar g suficientemente. En la práctica, sin embargo, debido a que el KSS de la mezcla depende del número g de componentes diferentes de forma logarítmica, se necesita un número exponencialmente grande y, por tanto, poco realista de isómeros de las moléculas presentes en el gas para que se llegue a violar la cota.

Para encontrar un contraejemplo a la cota KSS, se necesitaría un gas de moléculas muy compactas y ligeras que se pudiese enfriar sin condensarse, o que, a falta de estas tres condiciones, tuviese un número astronómico de isómeros. El helio cumple las tres condiciones y se queda a un factor 8,8 de la cota en su punto crítico (las condiciones en que helio gaseoso y líquido coexisten a la mayor temperatura posible), pero no tiene isótopos ni isómeros que, al incrementar la entropía de mezcla, hagan que se sobrepase la cota.

Aunque la cota KSS permite bajas viscosidades siempre que la densidad de entropía también sea pequeña, no parece fácil conseguir un fluido perfecto con entropía finita. En todo caso, la búsqueda de esa pluscuamperfección continúa.

Antonio Dobado
y **Felipe J. Llanes-Estrada**
Departamento de Física Teórica I
Universidad Complutense de Madrid

Evolución

El gen del “lenguaje”, FOXP2, parece esencial para la vocalización animal

Según Johannes Krause, del Instituto Max Planck de Antropología Evolutiva de Leipzig, “nada confirma que los neandertales *carecieran* de facultades lingüísticas”. De hecho, el descubrimiento reciente de Krause y sus colaboradores de que los neandertales y los seres humanos poseen la misma versión del gen *FOXP2* (el único gen vinculado al lenguaje hasta el momento) podría ser una prueba de tales dotes.

Aunque los estudios con seres humanos contemporáneos indiquen que *FOXP2* es necesario para el habla, nadie cree que baste. El gen representa sólo una pieza de un complicado rompecabezas, recuerda Simon Fisher, de la Universidad de Oxford, que formó parte del equipo que lo descubrió. La secuencia del neandertal resulta interesante en sí misma, pero aporta escasa información sobre sus posibilidades lingüísticas. “Ningún factor genético en solitario permite declarar que una especie extinta hablase”, apunta Fisher.

A pesar de varios años de estudio intenso, se duda sobre la acción de *FOXP2*, sobre su parte en la evolución del lenguaje. Habrá que aguardar la investigación paleoantropológica para seguir avanzando. Con todo los estudios sobre animales vivos están empezando a dar sus primeros frutos. Se ha vinculado el gen con sonidos complejos del reino animal; cabe, pues, lucubrar si tales com-

portamientos no representarían el fundamento sobre el que se ha construido el lenguaje humano.

Una familia inglesa, cifrada en la palabra "KE", permitió establecer la relación entre *FOXP2* y el lenguaje. Muchos de sus miembros padecen trastornos importantes del lenguaje. Luchan por controlar sus movimientos faciales y presentan dificultades en la lectura, la escritura, la gramática y la comprensión del habla.

En 2001, Fisher y sus colaboradores hallaron que el gen que constituía el origen del problema de la familia era *FOXP2*, alojado en el cromosoma siete. Responsable de la síntesis de una proteína que se une al ADN, activando o inactivando otros genes. El grupo de Fisher publicó un estudio en el que se identificaron los 100 genes cuya actividad venía condicionada por *FOXP2*. Resultaba que muchos de los genes se encontraban involucrados en el desarrollo y organización del sistema nervioso.

Pero la mayoría de los trastornos del habla (que afectan a alrededor del cinco por ciento de todos los niños y tienen un fuerte componente hereditario) no implican mutaciones en el gen *FOXP2*. Con mayor frecuencia corresponden a interacciones entre muchos genes y factores ambientales, sostiene Barbara Lewis. Para esta estudiosa de los trastornos de la comunicación se trata de un gen muy importante, pero no es el único gen del habla.

La idea de que ciertas alteraciones en *FOXP2* habrían impulsado la evolución del lenguaje se reforzó con el descubrimiento de que las versiones de la proteína en el chimpancé y el ser humano diferían en dos aminoácidos. Esta disparidad puede parecer insignificante, pero FOXP2 es una de las proteínas de los vertebrados menos variable. Las formas del ratón y del chimpancé discrepan en un aminoácido; divergieron hace 60 millones de años, en comparación con los seis millones de años que hace que se separaron el ser humano y el chimpancé.

Por otro lado, algunas pruebas han sembrado confusión sobre la vinculación de *FOXP2* con la evolución del lenguaje. Las mutaciones que causan defectos en el habla en los seres humanos no afectan a aquellas partes de *FOXP2* que son propias de nuestra especie. Y algunas de las alteraciones en los seres humanos, que se reputaban exclusivas de nuestra especie, se están observando en otros mamíferos (los gatos), según Stephen Rossiter, de la Universidad Queen Mary de Londres. A medida que se investigan otras especies van apareciendo más diferencias.

Rossiter y sus colaboradores publicaron que la ecolocalización de los murciélagos representa una excepción a la regla de la naturaleza inalterable de *FOXP2*: el gen varía ampliamente en el seno del grupo. El número de alteraciones dentro de los murciélagos duplica la cifra hallada en los demás vertebrados examinados. Descubrimiento que avala la hipótesis de que la versión humana de *FOXP2* reviste importancia particular en lo concerniente al control físico del habla. Igual que con el habla, en la que intervienen más de 100 músculos, la emisión de los sonidos necesarios para el sonar de los murciélagos exige una coordinación complejísima de la cara y la boca, afirma Rossiter.

Los murciélagos son uno de los pocos animales que demuestran aprendizaje vocal, junto con los humanos, ciertas aves canoras, ballenas y delfines. Es decir, los sonidos que producen no son innatos, sino que requieren la práctica y la imitación. Los estudios en aves canoras apoyan la relación entre *FOXP2* y el aprendizaje vocal, lo que indica que, además de controlar cómo se forma nuestro cerebro, el gen influiría también en la manera en que éste se utiliza. El gen cambia su actividad en los cerebros de los pájaros adultos cuando aprenden y practican sus melodías, según ha demostrado Stephanie White, de la Universidad de California en Los Angeles, quien sostiene que es posible que la circuitería neuronal de las aves coincida con la que sentó las bases del lenguaje humano. Los datos apuntan a que *FOXP2* representaría un interruptor que las diferentes especies emplean en su maquinaria neural de distinta forma.

La historia del gen muestra que la evolución se basa en materiales antiguos y les da un nuevo uso, reseña Gary Marcus, de la Universidad de Nueva York. "Es una buena introducción al problema de la relación del lenguaje con cualquier preadaptación lingüística que hayamos heredado de nuestros antepasados".

John Whitfield

Chillidos, melodías y frases parecen depender de un mismo gen, el denominado *FOXP2*.

LA TRAYECTORIA DE *FOXP2*

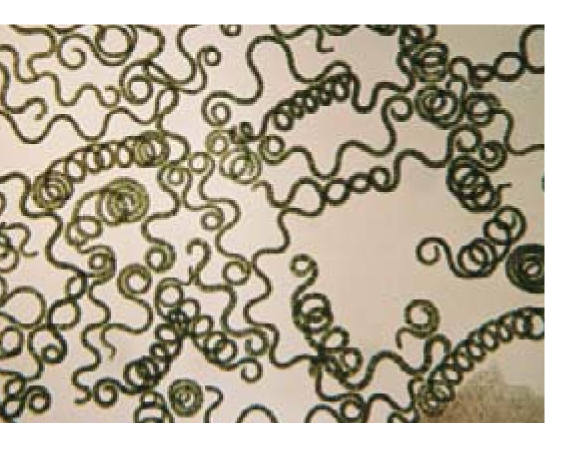
Johannes Krause no podía creerse lo que acababa de descubrir: los neandertales poseían la misma versión del gen *FOXP2* que los humanos. Su investigación anterior sobre variabilidad genética en las poblaciones contemporáneas le habían convencido de que la forma humana del gen surgió hacía unos 200.000 años (150.000 años después de que los neandertales y los seres humanos actuales divergieran). Ahora, reflexiona, se impone revisar nuestro conocimiento sobre la trayectoria evolutiva del hombre reflejada en nuestras características genéticas actuales.

Sostiene Krause que *FOXP2* ha experimentado una presión selectiva reciente en el linaje humano. Puede haberse modificado justo antes de que divergieran neandertales y humanos, si es que no contribuyó a una mayor inteligencia en nuestro antepasado común. "En el registro fósil de hace 500.000 años existe un aumento impresionante del tamaño cerebral. No puede afirmarse que tenga que ver con *FOXP2*, pero algo estaba ocurriendo".

Spirulina

Desde la época de los aztecas se viene consumiendo esta cianobacteria por su valor nutritivo y sus propiedades terapéuticas

Spirulina sp., es una cianobacteria filamentosa que actualmente ha sido descrita dentro del género *Arthrospira*. Las especies *A. platensis* y *A. maxima* revisten cierta importancia económica, pues a partir de ellas se elaboran suplementos dietéticos y alimentos funcionales (nutracéuticos) muy diversos. Ambas especies medran en cuerpos de agua alcalinos, donde crecen de forma masiva.



1. Fotografía al microscopio de *Spirulina* sp.

Aztecas y kanembous

Los antiguos habitantes de la ciudad mexicana de Tenochtitlán gozaban de buena salud merced a una alimentación equilibrada. Basaban su dieta en el maíz (representaba el 80 por ciento), otros cultivos terrestres (calabaza, chile, amaranto) y productos obtenidos del conjunto lacustre del Valle de México, como la hueva de mosco y el "alga espirulina".

De acuerdo con las crónicas de Francisco Hernández y de Fray Toribio de Benavente, en algunas localidades del vaso del lago del Valle de México, los aztecas colectaban, en determinaba época del año, una especie de lodo muy fino de color azul con sabor a queso y olor a cieno. Le daban el nombre de *tecuitlatl* ("excremento de piedra" en náhuatl). Lo secaban al sol, sobre la arena; una vez seco le daban forma de tortas, que ponían sobre hierba fresca. Se comía luego en pequeñas cantidades, con tortillas, o se utilizaba para condimentar el maíz (en lugar de sal).

En 1940, P. Dangeard publicó una investigación sobre el *dihé*, una sustancia que consumía el pueblo de Kanem. Veinticinco años más tarde, J. Léonard, miembro de la expedición belga que recorriera el Sahara desde el Atlántico hasta el mar Rojo, resaltaba la abundancia de una "microalga" que se cosechaba en red; según él, se trataba de una especie emparentada con la que se vendía en forma de galletas en la región del lago Chad. El análisis de las galletas reveló que contenían *Arthrospira platensis*, la misma cianobacteria que se halló en las muestras colectadas por Léonard. Los kanembous, habitantes de Kanem, al norte de Chad, vienen consumiendo y comercializando esa cianobacteria desde hace largo tiempo, en forma de galletas *dihé* ("madre de la salsa"). Constituyen la principal aportación proteínica de su dieta.

Mientras en Kanem siguen utilizando espirulina como fuente de alimento, en México, en cambio, el uso del *tecuitlatl* cayó en el olvido tras la conquista. Hasta 1967, cuando en los tanques de evaporación de la industria Sosa Texcoco S.A. se observó que esa cianobacteria crecía en grandes cantidades, no volvió a despertar interés. Junto con investigadores del Instituto Francés del Petróleo (IFP), se llevaron a cabo estudios y experimentos encaminados al aprovechamiento industrial del *tecuitlatl*, que se identificó como *Arthrospira maxima*. Se instaló una planta de procesamiento en las orillas del Caracol del Lago de Texcoco, con una producción cercana a las 500 toneladas de espirulina seca al año. Desgraciadamente, Sosa Texcoco cerró sus puertas, con lo que se abandonó la producción de la cianobacteria.

Propiedades nutritivas y terapéuticas

El valor de espirulina radica en su riqueza en macronutrientes y micronutrientes, algunos de los cuales no pueden ser sintetizados por el organismo humano. Destaca también por sus propiedades: es energética, reduce el estrés premenstrual, incrementa el rendimiento físico, mejora el apetito y ofrece protección antioxidante. Dada su riqueza en proteínas, aminoácidos, vitaminas, minerales y otros nutrientes, se usa como suplemento alimenticio: en forma de polvo, encapsulado, en tabletas, como sustituto de harina, en pastas para sopa, en aperitivos, en salsas, en golosinas o en bebidas instantáneas de frutas o vegetales.

Hoy se emplea cada vez más como fuente de pigmentos naturales, vitaminas y ácidos grasos, así como para la obtención de aditivos utilizados en fórmulas farmacéuticas y alimentación. En acuicultura sirve de alimento para moluscos, microartrópodos y, sobre todo, para peces, pues ayuda a mantener sana



CORTESIA DEL DR. FERNANDO MARTINEZ JERONIMO

2. Instalaciones de la planta Sosa Texcoco (ya desaparecida).

la piel e intensifica su coloración de la misma, además de incrementar la tasa de crecimiento, supervivencia y fecundidad del animal.

En fecha reciente se han acometido varios estudios sobre los efectos que *Arthrospira*, sp. ejerce sobre algunos roedores y en humanos. La cianobacteria muestra actividad inmunorreguladora, antioxidante, anticancerígena, antiviral, antitóxica y contra la hiperlipidemia y la hiperglucemia. Se ha comprobado su eficacia en el tratamiento de alergias, anemia, leucemia, otros tipos de cáncer, hepatotoxicidad, enfermedades víricas y cardiovasculares, diabetes, obesidad, inmunodeficiencia y procesos inflamatorios, entre otros trastornos. Por todo ello, la espirulina se considera un alimento nutracéutico (promotor de la salud). Varias de las propiedades antes mencionadas se deben a algunos de sus componentes, entre ellos el ácido graso poliinsaturado Ω-3 y Ω-6, el β-caroteno, el α-tocoferol, la ficocianina y compuestos fenólicos.

En la actualidad, las principales compañías productoras de *Arthrospira*, sp., la mayoría en Asia, la cultivan de forma intensiva en estanques artificiales. La producción oscila entre 13 y 450 toneladas de biomasa al año. La biomasa se deshidrata y pulveriza luego para fabricar comprimidos o encapsulados que se venden como suplementos dietéticos.

Liliana Ramírez Moreno
Roxana Olvera Ramírez
Escuela Nacional de Ciencias Biológicas
Instituto Politécnico Nacional
México

Efecto bactericida del aceite de oliva

El aceite de oliva contiene polifenoles, que muestran una notable actividad antimicrobiana

El uso del aceite de oliva y de los extractos de hojas de olivo para el tratamiento de enfermedades de origen microbiano y la conservación de alimentos expuestos a la contaminación por patógenos se remonta al antiguo Egipto. Pero hubo que esperar hasta mediados de los años sesenta del siglo pasado para acometer los primeros estudios de identificación de compuestos antibacterianos en productos derivados de la aceituna (en las salmueras de fermentación de aceitunas de mesa, por ejemplo).

De esas investigaciones se desprendió la asociación de la actividad antibacteriana con la oleuropeína, un compuesto polifenólico antioxidante de sabor amargo que se encuentra en las aceitunas y las hojas de olivo, aunque no en el aceite. La búsqueda de agentes antimicrobianos en el aceite prosiguió.

El aceite de oliva virgen se obtiene mediante el procesamiento mecánico directo de las aceitunas, que no se someten a ningún tipo de refinación química. El aceite retiene, por tanto, numerosos compuestos minoritarios a los que se atribuyen propiedades beneficiosas para la salud humana. Algunas de esas sustancias, los polifenoles entre ellas, muestran una intensa actividad antimicrobiana.

Los estudios *in vitro* han revelado que el aceite de oliva virgen inhibe el crecimiento de ciertos patógenos alimentarios, muy perjudiciales para la salud humana: *Salmonella enterica*, *Listeria monocytogenes*, *Shigella sonnnei* y *Escherichia coli* O157:H7, entre otros. Se han obtenido resultados similares para aceites esenciales y extractos de plantas, pero en ningún caso superiores a los del aceite de oliva virgen.

El uso de aceite de oliva virgen en mayonesas y ensaladas reduce la contaminación por patógenos de los alimentos. En investigaciones sobre supervivencia de patógenos en alimentos líquidos se ha observado que el aceite de oliva virgen ejerce una actividad bactericida superior a todos los otros productos analizados (vino, té, café, cerveza, *Coca Cola*, zumos, etcétera), con la salvedad del vinagre. Esa bioactividad superior obedece a la presencia de sustancias polifenólicas.

La actividad bactericida del aceite de oliva se ha demostrado también *in vitro* frente a *Helicobacter pylori*, bacteria responsable de la mayoría de úlceras de estómago y asociada al cáncer del mismo. Se ha confirmado que los compuestos polifenólicos del aceite de oliva matan la bacteria, incluidas algunas cepas resistentes a antibióticos. Asimismo, se ha comprobado, mediante simulación de la digestión, que las sustancias polifenólicas implicadas en la acción bactericida se difunden al jugo gástrico y resisten durante horas sus condiciones ácidas. De lo que se desprende que esas sustancias antimicrobianas se hallarán disponibles y activas en el estómago durante el período postpandrial (tras la ingestión del alimento). De confirmarse *in vivo* los resultados, el aceite de oliva virgen se revelaría como un alimento preventivo, que evitaría la formación de úlceras de estómago.



Aceite de oliva virgen. Un alimento con elevada actividad bactericida.

Eduardo Medina, Concepción Romero,
Antonio de Castro, Manuel Brenes
Instituto de la Grasa (CSIC),
Sevilla

EL FUTURO DE LA FISICA

INTRODUCCION

La llaman la escala "tera". Es el ámbito de la física que se explora cuando dos partículas elementales se estrellan entre sí con una energía combinada de alrededor de un billón de electronvolt, un teraelectronvolt.

La máquina que nos llevará a la escala tera, el Gran Colisionador de Hadrones (LHC), un acelerador del CERN en forma de anillo, está casi acabada.

El ascenso por las escalas de energía desde los electronvolt hasta la escala tera parte del mundo corriente y recorre paisajes distintos: de los dominios de la química y de la electrónica del estado sólido (con energías del orden del electronvolt) a las reacciones nucleares (con millones de electronvolt) y de ahí hasta el territorio que los físicos de partículas han venido investigando durante el último medio siglo, el de los miles de millones de electronvolt.

¿Qué nos está esperando en la escala tera? Nadie lo sabe. Pero está casi garantizado que se producirán fenómenos radicalmente nuevos, de un tipo o de otro. Se espera detectar partículas muy buscadas que podrían completar nuestro conocimiento de la naturaleza de la materia. También pueden tener lugar descubrimientos más extraños, señales de dimensiones adicionales, por ejemplo.

Ya se están elaborando planes para una máquina que sucederá y complementará el LHC dentro de más de diez años. Añadirá precisión a los mapas aproximados que se deducirán de los datos del LHC.

Al final de este "viaje" a la escala tera y más allá, sabremos de qué estamos hechos y cómo funciona realmente el lugar donde vivimos. Como el propio LHC terminado, habremos cerrado el círculo.

SUMARIO





1. EN LA DIVERSIDAD de partículas conocidas que surgirán de cada colisión, sólo de vez en cuando se incluirá algo nuevo y maravilloso.

SLIM FILMS

EL GRAN COLISIONADOR DE HADRONES

Una colaboración de científicos de todo el mundo está preparando la puesta en marcha del mayor dispositivo experimental de física de partículas de la historia

Graham P. Collins

Cabe verlo como el mayor y más potente microscopio de la historia de la ciencia. El Gran Colisionador de Hadrones (LHC), a punto de inaugurarse, sondeará, bajo los aledaños de Ginebra, las menores distancias (hasta un nano-nanómetro) y energías más altas jamás analizadas. Los físicos de partículas llevan más de diez años esperando una oportunidad de explorar ese dominio, a veces llamado la escala tera por su gama de energías: del orden de un billón de electronvolt, o 1 TeV. Se espera que se produzcan hallazgos físicos importantes a estas energías, como el de la escurridiza partícula de Higgs (de la que se cree que dota de masa a otras partículas) y el de las partículas que constituyen la materia oscura, que comprende la mayor parte de la materia del universo.

La gigantesca máquina, tras un período de construcción de nueve años, debería empezar a producir haces de partículas el año en curso. Está previsto que la puesta a punto progrese de un haz a dos, y a conducirlos a que choquen; desde energías menores hasta la escala tera; de bajas intensidades de prueba a las más intensas, válidas para la producción de datos a ritmos útiles, pero más difíciles de controlar.

Cada mojón del camino traerá sus propias dificultades, que los más de 5000 científicos, ingenieros y becarios que colaboran en la gigantesca tarea deberán superar. Cuando visité el proyecto en otoño de 2007 para obtener una impresión de primera mano de los preparativos, encontré que todos con quienes hablé expresaban una tranquila confianza en su éxito final, a pesar de los repetidos retrasos. Los físicos de partículas aguardan expectantes los primeros resultados del LHC. Frank Wilczek, del Instituto



CONCEPTOS BASICOS

- El Gran Colisionador de Hadrones (LHC), el mayor y más complicado dispositivo experimental de física de partículas jamás construido, está a punto de quedar concluido. De acuerdo con lo previsto, debería producir ya colisiones de protones este mismo año.
- El LHC acelerará paquetes de protones a las mayores energías nunca generadas por una máquina. Colisionarán frontalmente 30 millones de veces por segundo. En cada colisión, se expulsarán miles de partículas a una velocidad próxima a la de la luz.
- Los físicos esperan que el LHC inaugure una nueva era de la física de partículas en la que se resuelvan las principales incógnitas sobre la composición de la materia y la energía en el universo.

CARACTERISTICAS

VELOCIDAD DE LOS PROTONES:
99,9999991 % de la velocidad de la luz

PROTONES POR PAQUETE:
Hasta cien mil millones

NUMERO DE PAQUETES:
Hasta 2808

CRUCE DE PAQUETES POR SEGUNDO:
Hasta 31 millones, en cuatro puntos

COLISIONES POR CRUCE DE PAQUETES:
Hasta 20

DATOS POR COLISION:
En torno a 1,5 megabytes

NUMERO DE PARTICULAS DE HIGGS:
1 cada 2,5 segundos (a plena luminosidad de los haces y si se cumplen ciertas hipótesis acerca del Higgs)

de Tecnología de Massachusetts, se hace eco de un sentimiento común cuando habla de la esperanza de que el LHC lleve a "una edad de oro de la física".

Una máquina de superlativos

Para entrar en el nuevo territorio que supone la escala tera, los parámetros básicos del LHC superan los de los anteriores colisionadores en casi todos los aspectos. Sus haces de protones tienen energías mucho más altas. Sus casi 7000 imanes, refrigerados por helio líquido a menos de dos grados Kelvin para que sean superconductores, dirigirán y focalizarán dos haces de protones cuya velocidad se acercará a la de la luz en menos de una millonésima de un uno por ciento. Cada protón tendrá unos 7 TeV de energía, 7000 veces tanta energía como la que contiene en su masa un protón en reposo, según la fórmula de Einstein $E = mc^2$. Esa energía viene a septuplicar la que imparte el que hasta ahora era el acelerador más poderoso, el colisionador Tevatrón, del Laboratorio del Acelerador Nacional Fermi, en Batavia.

Reviste idéntico interés el diseño de la máquina, proyectada para producir haces con 40 veces la intensidad, o luminosidad, de los haces del Tevatrón. Cuando el LHC esté completamente cargado y con la máxima energía, las partículas que circulen por él tendrán una energía más o menos igual a la energía cinética de más de 900 coches que viajen a 100 kilómetros por hora, suficiente para calentar el agua de unos 2000 litros de café.

Los protones viajarán en unos 3000 paquetes, distribuidos a lo largo de los 27 kilómetros de circunferencia del colisionador. Cada paquete, de hasta cien mil millones de protones, tendrá el tamaño de un alfiler y escasos centímetros de longitud; se comprimirán a unas 16 micras de diámetro, como el más fino de los cabellos humanos, en los puntos de colisión. Estos alfileres se cruzarán en cuatro puntos del anillo, donde se producirán más de 600 millones de colisiones de partículas por segundo. Hablando con propiedad, las colisiones, o sucesos, como los llaman los físicos, se producirán entre las partículas que componen los protones: quarks y gluones. El más violento de los choques liberará aproximadamente una séptima parte de la energía disponible en los protones padres, unos 2 TeV. (Por la misma razón, el Tevatrón se queda corto en un factor cinco para poder explorar la física de la escala tera, a pesar de la energía de 1 TeV de sus protones y antiprotones.)

Cuatro detectores gigantes —el mayor llenaría media catedral de Notre Dame de París y el más pesado contiene más hierro que la Torre Eiffel— harán el seguimiento de los miles de partículas arrojadas por cada colisión en sus respectivos centros y medirán sus propiedades. A pesar del tamaño de los detectores, algunos de los elementos han de colocarse con precisión de hasta 50 micras.

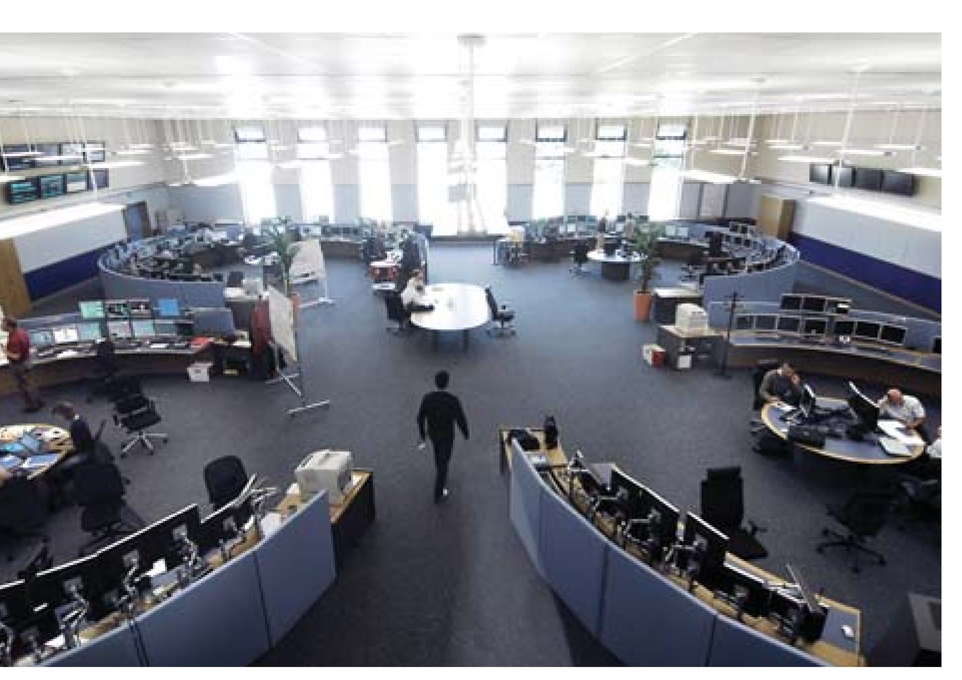
Los casi 100 millones de canales de datos de cada uno de los dos mayores detectores llenarían 100.000 CD por segundo, tantos como para levantar una pila hasta la Luna en seis meses. En lugar de intentar grabarlo todo, los experimentos tendrán, pues, sistemas de selección ("triggers", "disparadores") y de adquisición de datos. Actuarán como grandes filtros de correo basura. Descartarán inmediatamente la mayor parte de la información; cada segundo enviarán, para su archivo y posterior análisis, sólo los datos de los 100 sucesos que parezcan más prometedores al sistema de computación central del LHC en el CERN, el Laboratorio Europeo de Física de Partículas y sede del colisionador.

Una "granja" de unos cuantos millares de computadores del CERN convertirá los datos brutos filtrados en conjuntos de datos más compactos y organizados, para que los físicos los estudien. Para su análisis recurrirán a una red conformada por decenas de millares de ordenadores personales de centros de diversas partes del mundo, todos conectados a distribuidores o concentradores de una docena de centros en tres continentes, que a su vez están conectados al CERN mediante cables ópticos exclusivos.

Un viaje de mil etapas

En los próximos meses, todos los ojos estarán puestos en el acelerador. La conexión final

2. EL ACELERADOR LHC se controlará desde una sección (*abajo, a la derecha*) del centro de control del CERN. Los detectores tienen sus propios centros de control.



FRED MERZ *Rezo*



3. UNA REPARACION DE IMANES fue necesaria en 2007 después de que, durante una prueba de resistencia, se detectara un fallo de proyecto.

entre los imanes contiguos del anillo se hizo a principios de noviembre. Está previsto que los ocho sectores se habrán enfriado para junio hasta la temperatura criogénica requerida para el funcionamiento. Un sector ya se enfrió, se conectó a la red y luego se llevó de nuevo a temperatura ambiente a comienzos de 2007. Una vez el funcionamiento de los sectores se haya puesto a prueba, primero uno por uno y después en conjunto, como un sistema integrado, se inyectará un haz de protones en uno de los dos tubos de haz por los que circularán a lo largo de los 27 kilómetros de la máquina.

Ya se ha probado la serie de aceleradores más pequeños que suministran el haz al anillo principal del LHC: se llevaron protones con una energía de 0,45 TeV "hasta la puerta" desde la que se los inyectará en el LHC. La primera inyección del haz será un paso de importancia crítica. Se empezará con un haz de baja intensidad para reducir el riesgo de dañar el LHC. Sólo cuando se haya evaluado la respuesta del haz "piloto" en el interior del LHC y se hayan hecho finas correcciones a los campos magnéticos que dirigen el haz, se procederá con mayores intensidades. En el primer funcionamiento a la energía deseada de 7 TeV, sólo circulará un paquete de protones en cada sentido, no los casi 3000 que constituyen el objetivo final.

A medida que la plena puesta a punto del acelerador avance de esta manera controlada, paso a paso, irán apareciendo problemas. La incógnita es cuánto tiempo se tardará en vencer cada obstáculo. Si un sector tiene que ser llevado de nuevo a temperatura ambiente para reparaciones, como ha ocurrido en febrero y marzo con el sector 4-5, se añadirán meses al calendario.



CURIOSIDADES

INCLINACION

El túnel del LHC está inclinado un 1,4 por ciento respecto a la horizontal, a fin de que la mayor parte posible estuviera en roca sólida. Se halla a unos 50 metros de profundidad en el lado del lago Leman (Ginebra), y a unos 175 metros en el otro lado.

FASES DE LA LUNA

Con Luna llena, en la "marea alta", la circunferencia del LHC aumenta 1 milímetro y la energía del haz varía en un 0,02 por ciento. Los experimentadores deben tener en cuenta este efecto: deben conocer la energía del haz con una precisión de un 0,002 por ciento.

EL OCTOGONO

El túnel del LHC es en realidad octogonal, con ocho arcos conectados por ocho secciones rectas cortas que albergan los cuatro experimentos y los servicios relacionados con el control del haz.

EL ANILLO

El Gran Colisionador de Hadrones combina viejos y fiables caballos percherones con mastodontes que desbrozarán nuevos caminos. Aceleradores que tienen ya décadas de antigüedad, como el Sincrotrón de Protones y el Supersincrotrón de Protones, llevan los protones al 99,99975 por ciento de la velocidad de la luz. El LHC aumenta la energía de los protones casi 16 veces y los hace chocar 30 millones de veces por segundo hasta un máximo de 10 horas. Cuatro grandes experimentos generan más de 100 terabytes de datos de los choques cada segundo.



8,6 kilómetros

1
2
3
4
5

Supersincrotrón de Protones (SPS)

Sincrotrón de Protones (PS)

COSMOPOLITISMO

Internacional en todos sus aspectos, en el proyecto del LHC participan científicos y financiación de docenas de países: los 20 estados europeos miembros del CERN, seis estados observadores, entre ellos EE.UU., Japón y Rusia, y otros países como Canadá y China.

CMS
LHC
Versoix
Ferney Voltaire
FRANCIA
ALICE
St. Genis
SPS
ATLAS
PS
Meyrin
LHCb
Lago Leman
Detectores de partículas
SUIZA
Río Ródano
Ginebra

DON FOLEY (*ilustración*); CERN (*imagen aérea*); SIMON NORFOLK *NB Pictures/Contact Press Images* (*túnel LHC*); STEFANO DAL POZZOLO *Contrasto/Redux* (*CMS y ATLAS*); CERN GENEVA (*LHCb y ALICE*); MAPPING SPECIALISTS (*mapa*)

2 CMS

El Solenoide Compacto de Muones es uno de los dos detectores inespecíficos, imponentes, que perseguirán la búsqueda de partículas tales como el Higgs y otros nuevos fenómenos. Tiene cinco "ruedas de barrilete", del estilo de la mostrada, y tapas en sus extremos.





1 EL ACELERADOR LHC

Casi 7000 imanes superconductores dirigen los haces de protones alrededor del túnel que se construyó para el Gran Colisionador Electrón-Positrón (LEP) en 1989 y los mantiene focalizados en un haz no más ancho que un cabello.

3 LHC-b

Este detector busca quarks y antiquarks con sabor "belleza" (o de tipo fondo), para desentrañar la misteriosa ausencia de antimateria en el universo. Sólo controla uno de los lados de su punto de colisión.



De 50 a 175 metros de profundidad

4 ATLAS

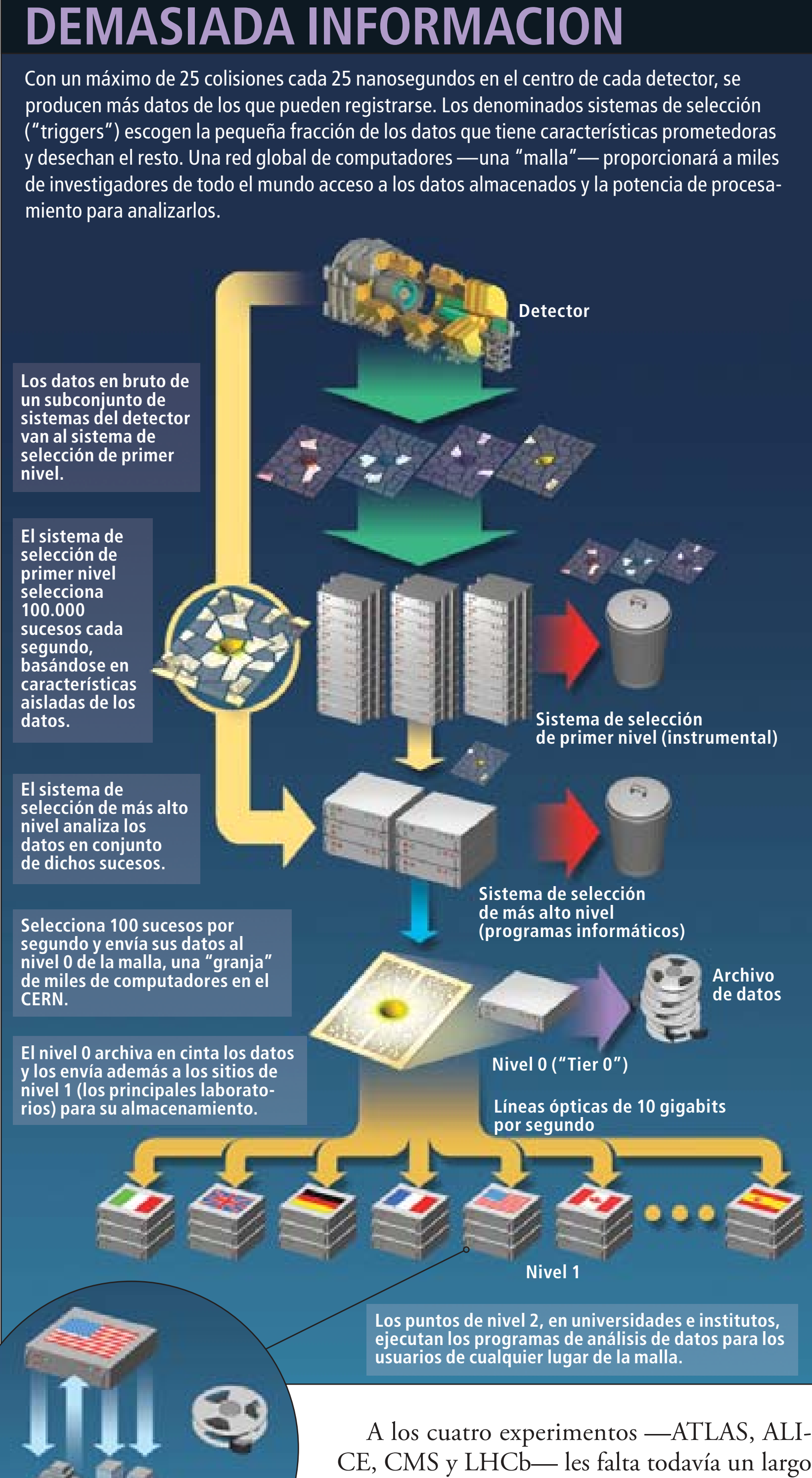
El "Aparato Toroidal del LHC" es otro detector de objetivo general, con un diseño exclusivo y basado en imanes toroidales en vez del tradicional solenoide. Las "grandes ruedas" (*a la derecha*) detectan partículas clave, los muones.



5 ALICE

El "Gran Experimento del Colisionador de Iones" estudia colisiones de iones de plomo (Pb) que producen "bolas de fuego" primordiales, de plasma de quarks y gluones. También estudia las colisiones protón-protón como punto de referencia.





A los cuatro experimentos —ATLAS, ALICE, CMS y LHCb— les falta todavía un largo proceso de finalización, Y habrá que cerrarlos para que comience la puesta a punto del haz. Se ha venido instalando algunas unidades de extrema fragilidad, como el "detector localizador de vértices", que se colocó en el LHCb a mediados de noviembre. Me especialicé en física teórica, no en física experimental, hace muchos años: no pude, pues, dejar de impresionarme ante aquellos gruesos ríos de miles de cables necesarios para conducir los canales de datos desde los detectores, cables que además están etiquetados uno a uno, deben encajar con la conexión correcta y han de ser comprobados por los actuales becarios.

Aunque quedan meses por delante hasta que los haces colisionen, algunos becarios e investigadores posdoctorales ya están trabajando con datos reales, procedentes de los rayos cósmicos que atraviesan las rocas de la frontera franco-suiza y entran en los detectores esporádicamente. Ver cómo reaccionan los detectores a estos intrusos es una comprobación en condiciones reales de que todo funciona bien, desde los suministros de tensión hasta los propios elementos del detector, desde la electrónica hasta los programas de adquisición de datos que integran los millones de señales individuales en una descripción coherente de un "suceso".

Ahora todo a la vez

Cuando el conjunto a una opere, y los haces choquen en el centro de cada detector, la tarea afrontada por los detectores y por los sistemas de procesamiento de datos será hercúlea. Con la luminosidad prevista, se producirán hasta 20 sucesos en cada cruce de los paquetes acuiformes de protones. Sólo pasarán 25 nanosegundos entre un cruce y el próximo (aunque entre algunos habrá lapsos mayores). Las partículas que se generen en una colisión en un cruce se distribuirán a través de las capas más externas del detector cuando acontezca ya el siguiente cruce. Los elementos individuales de cada una de las capas del detector responden cuando lo atraviesa una partícula de la especie adecuada. Los millones de canales de datos que salen del detector producen alrededor de un megabyte de datos por suceso: un petabyte, o mil millones de megabytes, cada dos segundos.

El sistema de selección que reducirá esta avalancha de datos a proporciones manejables tiene múltiples niveles. El primer nivel recibirá y analizará datos de sólo un subconjunto de los componentes del detector. De ahí, se seleccionarán sucesos prometedores basándose en factores varios; por ejemplo, que se haya observado un muón energético saliendo con un gran ángulo respecto al eje del haz. De esa selección de primer nivel se encargarán cientos de ordenadores, dedicados por entero a esa tarea e incorporados en el instrumental. Escogerá 100.000 paquetes de datos por segundo, que se analizarán con más detalle en la siguiente etapa, la selección de más alto nivel.

El sistema de selección de más alto nivel recibirá datos de todos los millones de canales del detector. Su programación informática se ejecutará en una "granja" de ordenadores; con

CENTRO ESPAÑOL *TIER-1* PARA LOS DATOS DEL LHC

Los físicos experimentales de partículas llevan decenios construyendo complejos detectores por medio de colaboraciones en las que intervienen muchas instituciones. Cada institución se responsabiliza de desarrollar y construir un "subdetector", y un equipo central de coordinación en el CERN asegura su perfecta integración para tener como resultado un único sistema coherente de detección de partículas. Las primeras estimaciones de la capacidad de procesamiento de datos necesaria para extraer resultados de los experimentos del LHC se realizaron en 1999 y fueron enormes, tanto, que desplegar dicha capacidad en un solo centro resultaba imposible, incluso para el CERN. Fue entonces cuando surgió la idea de acometer la computación del LHC de igual modo que la construcción de los detectores: de manera distribuida pero integrada.

Internet, la herramienta primordial para lograrlo, ya existía, y se ha desarrollado de manera impresionante. Las redes académicas, como RedIRIS en España, conectan a través de Internet desde el pequeño grupo universitario de un profesor y su estudiante hasta los grandes centros de investigación, como el CIEMAT en España y el CERN. Y gracias al auge de Internet, se han desarrollado técnicas para buscar y servir grandes cantidades de datos desde servidores específicos a miles de usuarios simultáneamente, por ejemplo los servidores de Google y YouTube. Sin embargo, apoyar a miles de físicos en sus búsquedas de agujas en el enorme pajar de datos producido por el LHC requiere algo más.

El análisis científico ha de ser riguroso, preciso, repetible. Cada físico filtrará los datos a su manera, y sus resultados no se han de mezclar con los de otros. Se necesita unir a través de Internet la capacidad de procesamiento de muchos centros esparcidos alrededor del globo, pero disponiendo el acceso de suerte que cada físico tenga su espacio virtual personal. Además, miles de gigabytes de datos han de fluir diariamente a través de los programas de los físicos, según sus exactas especificaciones y con tanta facilidad como la de mover un icono en la pantalla de un PC. La técnica adicional que permite crear este entorno es la malla o entramado digital ("grid" en inglés) que sirve no sólo para transmitir, sino también para direccionar y coordinar el acceso a datos, la asignación de ordenadores a trabajos y la entrega fiable de resultados a cada individuo.

La implantación de la malla para el LHC ha de tomar en cuenta las realidades de un entorno que gestiona millones de gigabytes por año. De manera análoga a la red de distribución eléctrica, la malla digital del LHC se construye en varias coronas o niveles ("tiers" en inglés): El CERN y una docena de centros *Tier-1* forman la primera corona, análoga a la red de alta tensión, que gestiona los procesos automatizados que reconstruyen y calibran los datos brutos de los detectores y los clasifican en categorías. Unos cien centros *Tier-2* constituyen una segunda corona, análoga a la red de media tensión, que alojan subconjuntos de los datos categorizados y reciben trabajos de análisis de los físicos. Dado que la carga impuesta por los físicos en un centro *Tier-2* es muy variable, cualquier capacidad de cálculo que no encuentre demanda se utiliza en las grandes simulaciones necesarias para extraer física de los datos. Finalmente, cada grupo de físicos dispone de una batería de ordenadores locales que constituyen la corona *Tier-3*, análoga a la instalación eléctrica en nuestras casas y despachos, para análisis interactivo con programas similares a hojas de cálculo pero capaces de gestionar cientos de gigabytes.



Biblioteca de cintas de almacenamiento en el PIC.

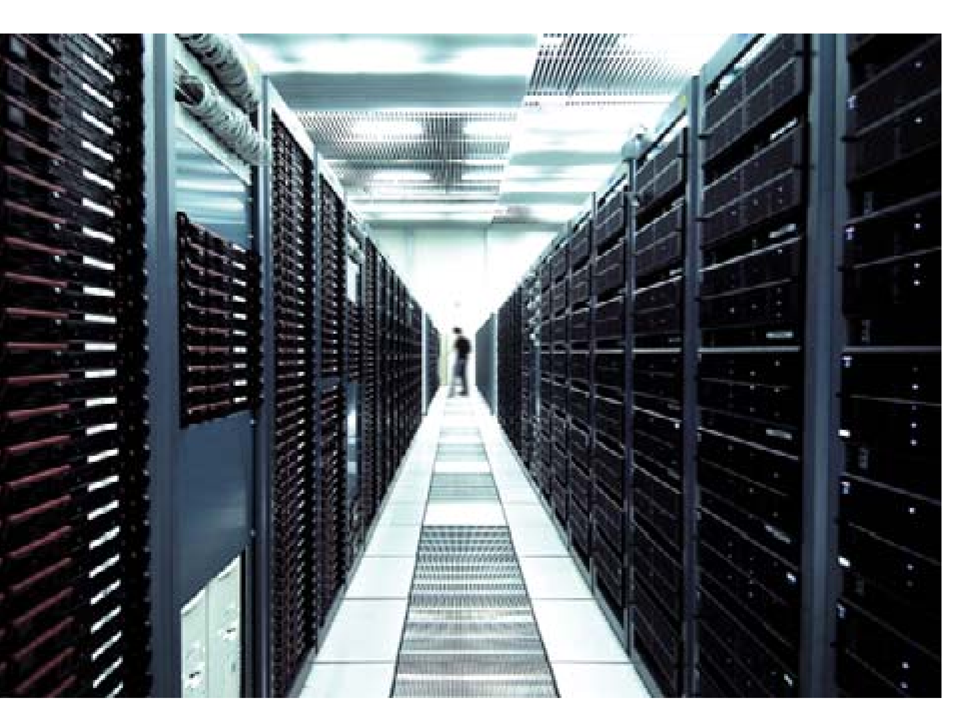
Europa, y España, han apostado fuertemente por el desarrollo de la computación para el LHC y, en paralelo, de una infraestructura de malla que la apoye. El Puerto de Información Científica (Port d'Informació Científica, PIC) nace en 2003 de la voluntad de España de albergar un centro *Tier-1* en su territorio. El PIC también coordina el centro de operaciones para España y Portugal de la infraestructura *grid* europea EGEE (Enabling Grid for E-sciencE, financiada por el Programa Marco de I+D de la UE. En sus primeros cinco años, el PIC ha crecido frenéticamente para lograr la capacidad necesaria. Se ha desplegado un almacenamiento en disco de 1 petabyte (un millón de gigabytes), ligado a cientos de ordenadores Linux y a dos bibliotecas robotizadas de cinta magnética. Se han perfeccionado las técnicas para lograr un crecimiento sostenido en los próximos años, ya que será necesario doblar la capacidad anualmente a medida que el LHC acumule más y más datos. Aún más importante, se ha constituido un grupo de ingenieros y técnicos informáticos y de físicos especializados en computación científica que aseguren que las inversiones en equipos se materialicen en servicios fiables para los experimentos y sus físicos.

El PIC es fruto de la colaboración, en la Universidad Autónoma de Barcelona, del Ministerio de Educación y Ciencia, a través del CIEMAT y del Programa Nacional de Física de Partículas, con la Generalidad de Cataluña, a través del Instituto de Física de Altas Energías (IFAE). Esta colaboración permite realizar en el PIC un programa de transferencia de tecnología desde la física a otros campos que se benefician del tratamiento masivo de datos; por ejemplo, la investigación con imágenes médicas.

Manuel Delfino
es catedrático de física de la Universidad Autónoma de Barcelona y director del PIC. Entre 1999 y 2002 fue Director de Tecnologías de la Información del CERN

un promedio de 10 microsegundos entre cada paquete aceptado por el sistema de selección de nivel uno, tendrá suficiente tiempo para la "reconstrucción" de cada suceso: proyectará las trazas hasta sus puntos de origen común y formará así un conjunto coherente de datos —energías, momentos, trayectorias, etcétera— de las partículas producidas en cada suceso.

El sistema de selección de más alto nivel pasa cerca de 100 sucesos por segundo al distribuidor de la red de recursos informáticos global del LHC, la "malla de computación del LHC". Un sistema en malla combina la



4. MILES de procesadores del CERN están conectados entre sí a fin de proporcionar la capacidad de computación necesaria para manejar los datos a medida que fluyen de los experimentos.

potencia procesadora de una red de centros de computación y la pone al servicio de los usuarios que tengan permiso para conectarse a la malla desde las instituciones donde trabajen [*véase* "La malla: Computación sin límites", por Ian Foster; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, junio de 2003].

La malla del LHC está organizada en niveles ("tiers"). El nivel 0 está en el propio CERN; en su mayor parte consta de miles de procesadores de computadores comerciales, tanto "cajas" del estilo de un ordenador personal como, más recientemente, sistemas en "bandeja", de dimensiones similares a las de una caja de pizza pero en negro, apilados, una fila sobre otra, en estantes (*véase la figura 4*). Los computadores se han estado comprando y añadiendo al sistema hasta el último momento. Igual que un usuario doméstico, los encargados de la adquisición miran cualquier ocasión ventajosa y evitan los modelos más nuevos y más potentes en favor de otros más económicos.

Los datos que pasan al nivel 0 desde los sistemas de toma de datos de los cuatro experimentos del LHC se archivarán en cinta magnética. Quizá parezca un método desfasado, una solución rudimentaria en esta época de discos DVD-RAM y otros artefactos modernos, pero François Grey, del Centro de Computación del CERN, dice que se trata del método más rentable y seguro. El nivel 0 distribuirá los datos a los 12 centros de nivel 1, que se encuentran en el propio CERN y en 11 centros más de Estados Unidos, Europa, Asia y Canadá, como el Fermilab y el Laboratorio Nacional de Brookhaven o el Puerto de Información Científica, en la Universidad Autónoma de Barcelona (*véase el recuadro* "Centro Español *Tier-1* para los datos del LHC"). Así, existirán dos copias de los datos sin procesar, una en el CERN y otra repartida por todo el mundo. Cada uno de los centros de nivel 1 almacenará también un conjunto completo de los datos en forma compacta y estructurada para que los físicos lleven a cabo muchos de sus análisis.

La malla de computación del LHC tiene también centros de nivel 2, centros de computación más pequeños en universidades e institutos de investigación. Los ordenadores de estos centros distribuirán capacidad de procesamiento por toda la malla para el análisis de los datos.

Camino difícil

Con todas las nuevas técnicas que se están preparando, no es de extrañar que el LHC haya sufrido contratiempos, algunos graves. En marzo de 2007, un imán de los que focalizan los haces de protones justo por delante de un punto de colisión (un imán cuadrupolar) sufrió una "grave avería". Estaban probando si aguantaría las grandes fuerzas a que estará sometido si las bobinas de los imanes pierden su superconductividad durante el funcionamiento del haz; un tipo de accidente que recibe el nombre de "quenching" (templado de un metal). Parte de los soportes del imán se vinieron abajo con la presión generada en la prueba. Se produjo un estruendo, como una explosión, y escapó gas helio.

Estos imanes van en grupos de tres, para concentrar el haz primero lateralmente, a continuación en la dirección vertical y por último otra vez lateralmente. Esta secuencia imparte al haz una fuerte focalización. El LHC utiliza 24 de ellos, un triplete a cada lado de los cuatro puntos de interacción. Al principio, los científicos del LHC no sabían si no se deberían sacar los 24 de la máquina y llevarlos a la superficie para su modificación, un proceso largo que podría haber alargado semanas el calendario previsto. El problema era un fallo de proyecto: los diseñadores del imán (investigadores de Fermilab) no habían tenido en cuenta todos los tipos de fuerzas que los imanes debían soportar. Los expertos del CERN y de Fermilab trabajaron febrilmente, identificaron el problema y elaboraron una estrategia para arreglar los imanes no dañados en el túnel del acelerador. (El triplete dañado en la prueba se extrajo hasta la superficie para su reparación.)

En junio, el director general del CERN, Robert Aymar, anunció que, debido al fallo del imán, junto a una acumulación de problemas menores, quedaba aplazada la fecha prevista



para la puesta en marcha del acelerador, desde noviembre de 2007 a la primavera de 2008. Ahora parece más bien que será en agosto.

Aunque algunas personas que trabajan en los detectores me insinuaron que estaban contentos de contar con más tiempo, el constante retraso de la fecha de puesta en marcha es motivo de preocupación. Cuanto más tiempo tarde el LHC en empezar a producir cantidades considerables de datos, más oportunidades tendrá el Tevatrón —que todavía está funcionando— de ganarle la mano. El Tevatrón podría encontrar pruebas del bosón de Higgs si la naturaleza le hubiese dado una masa que se mostrase justo ahora, en la creciente montaña de datos del Fermilab.

Los retrasos también pueden causar daños personales, por el precio que los becarios y científicos pagan al demorarse sus carreras mientras esperan los datos.

Otro problema que podía ser grave apareció en septiembre, al descubrirse que unos "dedos de cobre" que se deslizan por los tubos del haz, los módulos "enchufables" ("plug-in"), se arrugaron cuando un sector del acelerador, que se había enfriado a la temperatura criogénica necesaria para el funcionamiento, se calentó de nuevo hasta la temperatura ambiente.

Al principio se desconocía la magnitud del problema. El sector en el que se había llevado a cabo la prueba de enfriamiento tenía 366 de estos módulos. Abrir cada uno de ellos, inspeccionarlo y, posiblemente, repararlo hubiera sido terrible. En cambio, se abordó la cuestión ideando un sistema que insertaba una bola en el tubo del haz, del tamaño justo —un poco menor que una pelota de ping-pong— para que cupiese en él y se la pudiera empujar a lo largo del tubo mediante aire comprimido; debía ser, además, de un tamaño suficientemente grande como para que un módulo deformado la detuviese. La esfera contenía un transmisor de radio a 40 megahertz —la misma frecuencia a la que los paquetes de protones viajarán a lo largo del tubo cuando el acelerador funcione a pleno rendimiento—, lo que permitía el seguimiento de su avance mediante los sensores de haz que están instalados cada 50 metros. Para descanso de todos, este procedimiento puso de manifiesto que sólo seis de los módulos del sector habían funcionado mal, un número que permitía abrirlos y repararlos.

Cuando se hizo la última de las conexiones entre los imanes del acelerador en noviembre, cerrando el círculo y dejando vía libre al inicio del enfriado de todos los sectores, el jefe de proyecto Lyn Evans comentó: "Para una máquina de esta complejidad, las cosas van extraordinariamente bien, y todos esperamos hacer física con el LHC este verano".

Bibliografía complementaria

EL GRAN COLISIONADOR DE HADRONES. Christopher Llewellyn Smith en *Investigación y Ciencia*, n.º 288, págs. 66-75; septiembre 2000.

DISCOVERING THE QUANTUM UNIVERSE. Disponible en www.interactions.org/quantumuniverse/qu2006

Las páginas del CERN para el público están en http://public.web.cern.ch/public

Los enlaces a los experimentos del LHC están en http://lhc.web.cern.ch/lhc/LHC_Experiments.htm

Blogs del LHC en los Estados Unidos. Monica Dunford, Pamela Klabbers, Steve Nahn y Peter Steinberg. Disponibles en www.uslhc.us/blogs

Seguimiento de la situación diaria de la puesta a punto del acelerador en http://lhc.web.cern.ch/lhc



REVOLUCION EN LA FISICA DE PARTICULAS

Todo cuanto el nuevo Gran Colisionador de Hadrones nos haga ver adentrará la física en nuevos territorios

Chris Quigg



CONCEPTOS BASICOS

- Es seguro que al internarnos en territorios vírgenes mediante el Gran Colisionador de Hadrones (LHC) se lograrán descubrimientos nuevos y apasionantes.
- El modelo estándar de física de partículas requiere el bosón de Higgs, o de un sustituto que haga sus funciones, a las energías que va a sondear el LHC. El Higgs, a su vez, plantea por sí mismo profundas cuestiones, cuya respuesta se debería hallar en su misma gama de energías.
- Los fenómenos anteriores giran en torno a la noción de simetría. La simetría subyace a las interacciones del modelo estándar, pero no siempre quedan reflejadas en el funcionamiento del modelo. El problema crucial es comprender por qué.

Cuando se les pide a los físicos que justifiquen con una palabra el porqué del Gran Colisionador de Hadrones (LHC) suelen responder: “Higgs”. La búsqueda de la partícula de Higgs constituye un paso crucial, pero es sólo el primer paso. Bajo ella subyacen fenómenos que pudieran aclarar por qué la fuerza de atracción gravitatoria es muchísimo más débil que las demás fuerzas de la naturaleza y que quizá revelen en qué consiste esa desconocida materia oscura que llena el universo. Las cuestiones en juego parecen estar todas ellas vinculadas entre sí y anudadas al problema que en un principio obligó a predecir la existencia de la partícula de Higgs. El GCH nos ayudará a refinar estas cuestiones y nos pondrá en el camino conducente a su solución.

La materia que tenemos al alcance

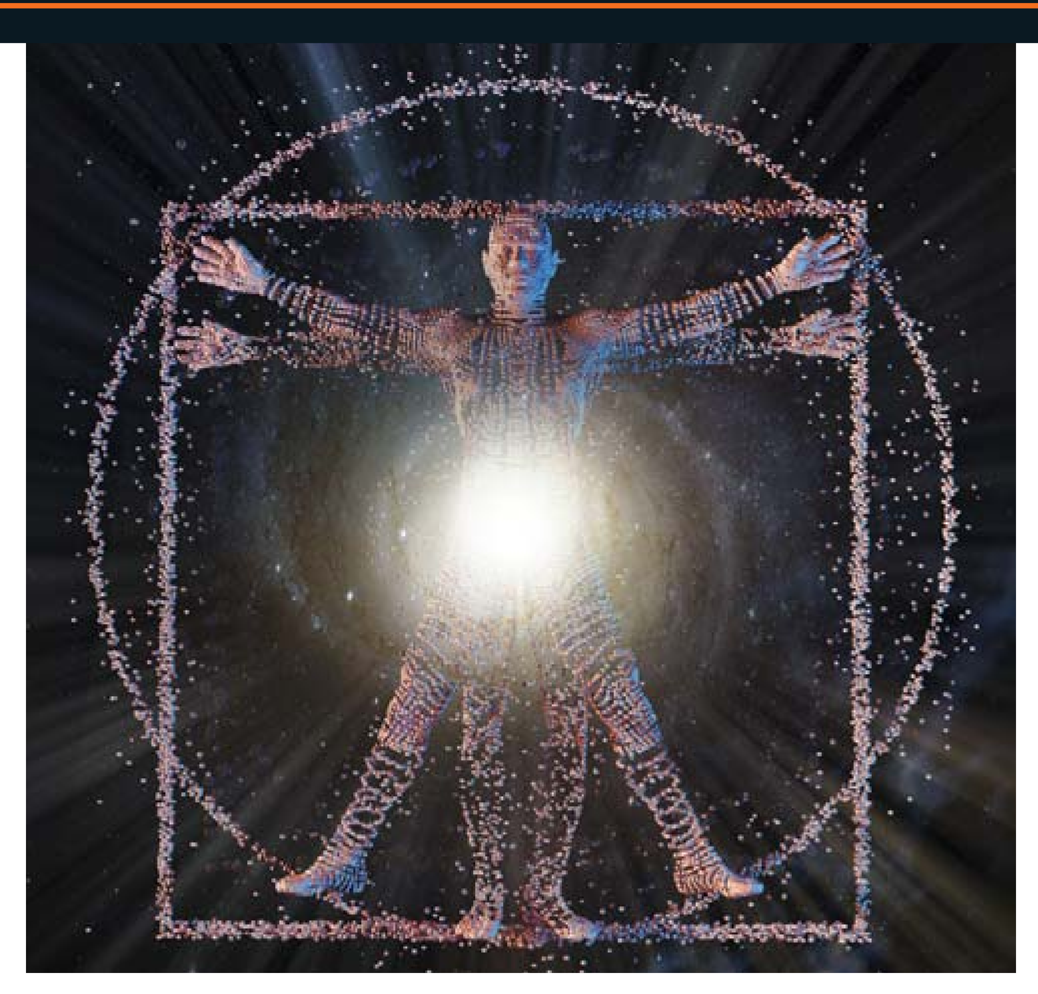
El llamado “modelo estándar” de la física de partículas (para señalar que se trata de una teoría en proceso de elaboración) puede explicar mucho del mundo conocido. Los elementos más importantes del modelo estándar fueron encajando en su lugar a lo largo de unos veinte años, desde los primeros años setenta, tiempos embriagadores, en los que una oleada de hitos experimentales trabó una productiva conversación con las ideas teóricas que se estaban gestando.

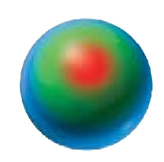
Muchos especialistas en física de partículas consideran que los 15 últimos años han sido de consolidación, en contraste con los decenios de fermento que les precedieron. Mas, a pesar de que el modelo estándar ha ido logrando cada vez más completa confirmación experimental, también es cada vez más larga la lista de fenómenos que escapan a sus previsiones. Nuevas ideas de carácter teórico han ampliado el aspecto de una cosmología posible, más amplia y comprensiva.

Tomados en conjunto, los continuos avances, tanto experimentales como teóricos, son augurio de un decenio de viva actividad. Tal vez, al volver la mirada hacia atrás, nos percatemos de que durante todo ese tiempo se ha estado gestando una revolución.

Según la concepción vigente, la materia consta de dos grandes categorías de partículas, quarks y leptones, en conjunción con tres de las cuatro fuerzas fundamentales conocidas, a saber, el electromagnetismo y las interacciones fuerte y débil. La gravedad, por el momento, ha sido dejada aparte. Los quarks, componentes de protones y neutrones, generan cada una de estas tres fuerzas y se someten a ellas. Los leptones, cuyo representante más conocido es el electrón, son inmunes a la fuerza fuerte. Lo que diferencia a estas dos categorías es el “color”, una propiedad que guarda una lejana semejanza con la carga eléctrica. (Es un nombre metafórico, sin nada que ver con los colores del espectro.) Los quarks poseen color; los leptones, no.

El principio director del modelo estándar dicta que sus ecuaciones son simétricas. De igual modo que una esfera ofrece el mismo aspecto desde cualquier punto de vista, así las ecuaciones del modelo subsisten sin variación al cambiar la perspectiva desde la que son definidas. Permanecen invariables, además, cuando





AL ESTUDIAR EL MUNDO con una resolución mil millones de veces más fina que la escala atómica, se busca lograr un conocimiento más profundo del mundo cotidiano y de la evolución del universo.

KENN BROWN (*hombre de Vitruvio*)

esta perspectiva se desplaza en distinta magnitud a diferentes puntos del espacio y el tiempo.

En los cuerpos geométricos, la exigencia de simetría les impone a sus posibles formas unas condiciones muy estrictas. Una esfera abollada no ofrece idéntico aspecto desde todos los puntos de vista. Análogamente, el requisito de simetría le impone a las ecuaciones exigencias no menos estrictas. Dichas simetrías engendran fuerzas transportadas por partículas especiales, los bosones [*véase* "Teorías gauge de las fuerzas entre partículas elementales", por Gerard't Hooft; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, agosto de 1980, y "Partículas y fuerzas elementales", por Chris Quigg; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, junio de 1985].

El modelo estándar torna del revés el aforismo arquitectónico de Louis Sullivan: en lugar de "la forma obedece a la función", aquí la función obedece a la forma. Es decir, la forma de la teoría, expresada en la simetría de las ecuaciones que la definen, dicta la función —las interacciones entre partículas— que la teoría describe. Por ejemplo, la fuerza nuclear fuerte se deduce del requisito de que las ecuaciones que describen quarks hayan de ser las mismas, con independencia de cómo se opte por definir los colores de los quarks (e incluso si este convenio es establecido de forma independiente en cada punto del espacio y del tiempo).

Las portadoras de la fuerza fuerte son ocho partículas denominadas gluones (de "glue", pegamento). Las otras dos fuerzas —la electromagnética y la nuclear débil— pertenecen al epígrafe "fuerzas electrodébiles" y se fundan en una simetría diferente. Las fuerzas electrodébiles presentan como portadoras a un cuarteto de partículas: el fotón, el bosón Z, el bosón W^+ y el bosón W^-.

Romper el espejo

La teoría de las fuerzas electrodébiles fue formulada por Sheldon Glashow, Steven Weinberg y Abdus Salam, galardonados con el premio Nobel de física de 1979. La fuerza débil, que interviene en la desintegración radiactiva beta, no actúa sobre la totalidad de los quarks y leptones. Cada una de estas partículas se presenta en dos variantes, espejo cada una de la otra: la variedad leptoquiral (o "de la mano izquierda") y la variedad dextroquiral. La fuerza de la desintegración beta actúa sólo sobre la variante leptoquiral, hecho desconcertante y todavía no explicado 50 años después de su descubrimiento. La simetría de familia que comparten las partículas leptoquirales contribuye a la definición de la teoría electrodébil.

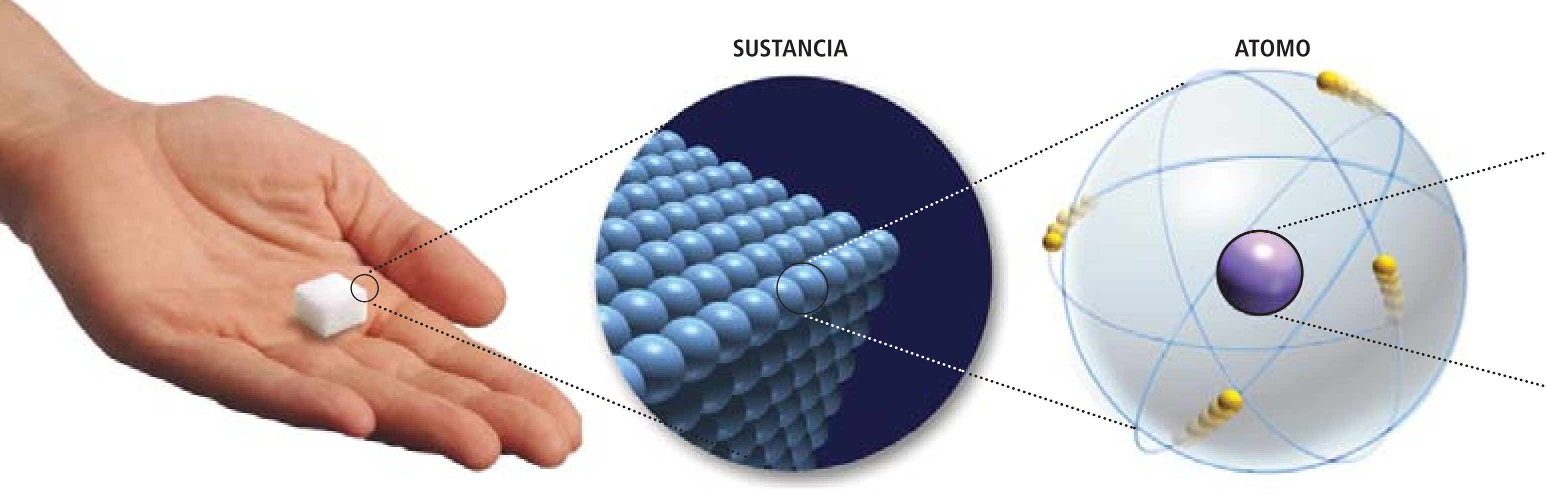
La teoría, en sus primeros estadios, presentaba dos deficiencias fundamentales. Ante

El autor

Chris Quigg se halla adscrito al Laboratorio Nacional del Acelerador Fermi, cuyo departamento de física teórica dirigió durante 10 años. Es autor de un renombrado texto sobre las llamadas teorías de aforo que subyacen al modelo estándar y ha sido redactor de *Annual Review of Nuclear and Particle Science*. La investigación de Quigg sobre la ruptura de la simetría electrodébil y la física de los supercolisionadores puso de relieve la importancia de la escala de los TeV.

¿Qué es en realidad la materia?

Un examen profundo de un fragmento de materia nos revela que está constituida por unos pocos tipos de partículas elementales, tomados de una "carta" que cuenta con una docena de "sabores". En el modelo estándar, las partículas son puntos geométricos; los "tamaños" presentados aquí aluden a sus masas.

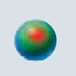


QUARKS



Estas partículas integran los protones, los neutrones y un auténtico zoo de partículas de menor renombre. Nunca han sido observados sueltos.

ARRIBA — u



Carga eléctrica: +2/3
Masa: 2 MeV
Constituyente de materia ordinaria. El protón consta de dos quark arriba y un quark abajo.

ENCANTO — c



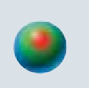
Carga eléctrica: +2/3
Masa: 1,25 GeV
Pariente inestable del anterior. Es un constituyente de la partícula J/ψ, que contribuyó al desarrollo del modelo estándar.

CIMA — t



Carga eléctrica: +2/3
Masa: 171 GeV
La partícula conocida de mayor masa, comparable a la de un átomo de osmio. Vida muy efímera.

ABAJO — d



Carga eléctrica: –1/3
Masa: 5 MeV
Constituyente de materia ordinaria. Dos quarks abajo más un quark arriba componen un neutrón.

EXTRAÑO — s

Carga eléctrica: –1/3
Masa: 95 MeV
Pariente inestable y de mayor masa del quark abajo. Constituyente de una partícula muy estudiada, el kaón.

FONDO — b



Carga eléctrica: –1/3
Masa: 4,2 GeV
Copia inestable del quark abajo, pero de masa mucho mayor. Constituyente de una partícula muy estudiada, el mesón B.

LEPTONES

Estas partículas son inmunes a la fuerza fuerte y observables como individuos aislados. Cada uno de los neutrinos que se muestran es en realidad una mezcla de especies de neutrinos, cuya masa no excede, en ningún caso, de unos pocos eV.

NEUTRINO ELECTRONICO — ν_e



Carga eléctrica: 0
Es inmune a la fuerza electromagnética y a la fuerte. Apenas interactúa. Es esencial para la radiactividad.

NEUTRINO MUONICO — ν_μ



Carga eléctrica: 0
Aparece en reacciones débiles en las que interviene el muón.

NEUTRINO TAUNICO — ν_τ



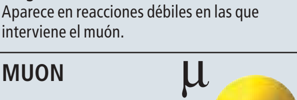
Carga eléctrica: 0
Aparece en reacciones débiles en las que interviene el leptón tau.

ELECTRON — e



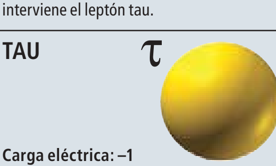
Carga eléctrica: –1
Masa: 0,511 MeV
La más ligera de las partículas con carga eléctrica. Citado sin cesar como portador de carga en la corriente eléctrica y por ser la partícula que orbita en torno a los núcleos atómicos.

MUON — μ



Carga eléctrica: –1
Masa: 106 MeV
Una versión del electrón con más masa. Su vida media es de 2,2 microsegundos. Descubierto en las lluvias de rayos cósmicos.

TAU — τ



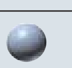


Carga eléctrica: –1
Masa: 1,78 GeV
Otra versión inestable y con una masa muchísimo mayor que la del electrón. Su vida es de 0,3 picosegundos.

BOSONES

A nivel cuántico, cada fuerza de la naturaleza es tansmitida por una partícula o conjunto de partículas especializadas.

FOTON — γ



Carga eléctrica: 0
Masa: 0
Es el cuanto de luz, portador del electromagnetismo. Actúa sobre partículas eléctricamente cagadas. Actúa a distancias ilimitadas.

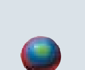
BOSON *Z* — Z

Carga eléctrica: 0
Masa: 91 GeV
Mediador de las reacciones débiles que no cambian la identidad de las partículas. Su alcance es de sólo unos 10^{-18} metros.

BOSONES *W+/W–* — W

Carga eléctrica: +1 o –1
Masa: 80,4 GeV
Mediadores de las reacciones débiles que cambian el "sabor" y la carga eléctrica de las partículas. Su alcance es de sólo unos 10^{-18} metros.

GLUONES — g



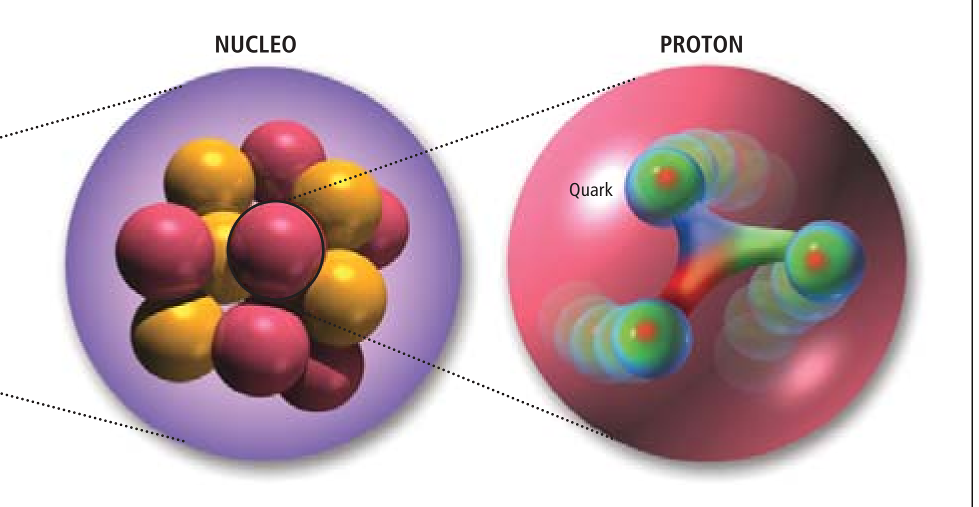
Carga eléctrica: 0
Masa: 0
Ocho especies de gluones portan la interacción fuerte y actúan sobre los quarks y los demás gluones. No experimentan ni la interacción electromagnética ni la débil.

HIGGS — H
(No observado aún)



Carga eléctrica: 0
Masa: no mayor, se cree, de 1 TeV; probablemente, entre 114 y 192 GeV
Se cree que provee de masa a los bosones W y Z, a los quarks y a los leptones.

SLIM FILMS

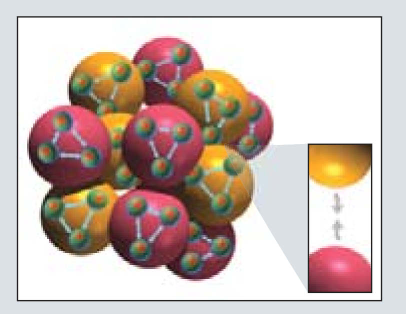


ASI ACTUAN LAS FUERZAS

Una interacción entre varias partículas en colisión puede cambiar su energía, su momento cinético o su tipo. Una interacción puede incluso ser la causa de que una partícula aislada se desintegre espontáneamente.

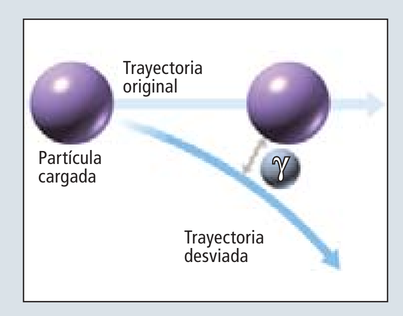
INTERACCION FUERTE

La fuerza fuerte actúa sobre los quarks y los gluones, los liga entre sí y forma protones, neutrones y otras partículas. De forma indirecta, también liga a los protones y neutrones, formando con ellos núcleos atómicos.



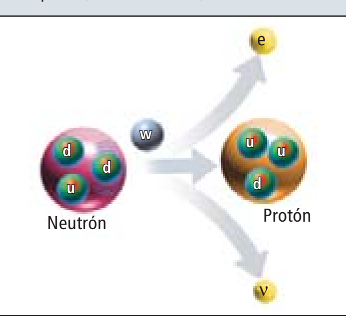
INTERACCION ELECTROMAGNETICA

La interacción electromagnética actúa sobre partículas cargadas, sin alteración de éstas. Es responsable de la repulsión de las cargas del mismo signo.



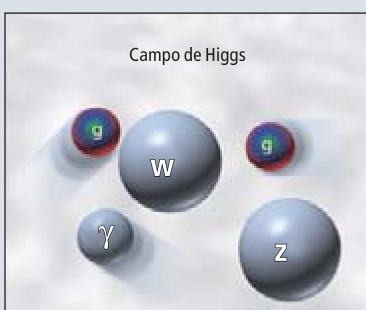
INTERACCION DEBIL

La interacción débil opera sobre quarks y leptones. Su efecto mejor conocido es la transmutación de un quark abajo en un quark arriba, lo que provoca, a su vez, que un neutrón se convierta en un protón, más un electrón, más un neutrino.



INTERACCION DE HIGGS

Se cree que el campo de Higgs (*fondo de color gris*) llena el espacio, como un fluido, estorbando a los bosones *W* y *Z*, y limitando con ello el alcance de las interacciones débiles. El bosón de Higgs interactúa también con los quarks y los leptones, dotándolos de masa.



todo, pronosticaba la existencia de cuatro partículas portadoras de fuerzas de largo alcance, denominadas bosones de aforo (*gauge*), pero la naturaleza sólo nos ofrece una, el fotón. Las otras tres son de muy corto alcance, inferior a 10^{-17} metros, es decir, menos del 1 por ciento del radio del protón. Según el principio de indeterminación de Heisenberg, de tan cortísimo alcance se sigue que las partículas de fuerza habrían de tener una masa que rondase los 10 GeV (10 gigaelectronvolt, o sea, 10.000 millones de eV). La segunda limitación concierne a la simetría de la familia, que no permite que posean masa ni los quarks ni los leptones; pero la poseen.

Una forma de salir de tan insatisfactoria situación consiste en admitir que una simetría en las leyes de la naturaleza no tiene por qué verse reflejada en el resultado de tales leyes. Se dice entonces que “se ha roto la simetría”. El aparato teórico necesario fue elaborado hace unos 40 años por los físicos Peter Higgs, Robert Brout, François Englert y otros. La inspiración llegó desde un fenómeno sin relación aparente: la superconductividad, en la cual ciertos materiales ofrecen, a temperaturas muy bajas, resistencia cero al paso de la corriente eléctrica. Las leyes propias del electromagnetismo son simétricas, pero el comportamiento del electromagnetismo dentro de un material superconductor no lo es. En el superconductor, los fotones adquieren masa, y limitan así la intrusión de campos magnéticos en el material.

Resulta que tal fenómeno constituye un prototipo perfecto para la teoría electrodébil. Si el espacio estuviera lleno de un tipo de “superconductor” que afectase a la interacción débil en lugar de afectar al electromagnetismo, le conferiría masa a los bosones *W* y *Z* y limitaría el alcance de las interacciones débiles. Este superconductor estaría formado por bosones de Higgs. También los quarks y los leptones adquieren su masa mediante interacciones con el bosón de Higgs [*véase* “El bosón de Higgs, por M. J. G. Veltman; Investigación y Ciencia, enero de 1987]. Estas partículas, al adquirir masa por este procedimiento, en lugar de poseerla en forma intrínseca, siguen siendo compatibles con lo exigido por la simetría de la fuerza débil.

La teoría electrodébil moderna (con bosones de Higgs) da cuenta con mucha precisión de un amplio abanico de resultados experimentales. De hecho, este paradigma (quarks y leptones como elementos constituyentes, en interacción mediante bosones de aforo) hizo revisar de raíz la concepción de la materia y apuntó la posibilidad de que las interacciones electromagnética, débil y fuerte se confundan en una, cuando las partículas estén provistas de energías muy elevadas. La teoría electrodébil constituye una

RUPTURA DE LA SIMETRIA

En el modelo estándar resulta esencial averiguar por qué las fuerzas electrodébiles son asimétricas: el electromagnetismo es de largo alcance, pero el radio de acción de la fuerza nuclear débil es muy pequeño. Se cree que estas fuerzas son, en realidad, simétricas, pero que su simetría está oculta, o como también se dice, "rota".

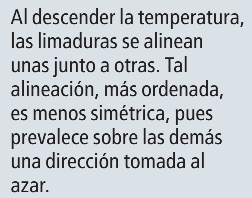
SIMETRIA MAGNETICA ESPACIAL

Imaginemos, como símil, una matriz o parrilla infinita de limaduras magnéticas. La simetría consistiría en la equivalencia espacial de todas las direcciones.

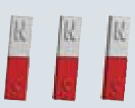
La simetría es evidente a temperaturas elevadas. Las limaduras, por agitación térmica, se orientan cada una libremente, en una dirección cualquiera.



Simetría



Al descender la temperatura, las limaduras se alinean unas junto a otras. Tal alineación, más ordenada, es menos simétrica, pues prevalece sobre las demás una dirección tomada al azar.

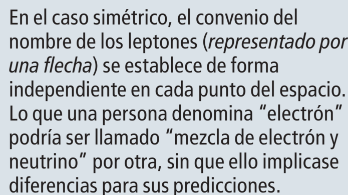


Simetría rota

SIMETRIA ELECTRODEBIL

Esta simetría es más abstracta. Significa que se tiene libertad para decidir qué leptones son electrones y cuáles, neutrinos, o bien para rotular los quarks arriba y abajo.





En el caso simétrico, el convenio del nombre de los leptones (*representado por una flecha*) se establece de forma independiente en cada punto del espacio. Lo que una persona denomina "electrón" podría ser llamado "mezcla de electrón y neutrino" por otra, sin que ello implicase diferencias para sus predicciones.



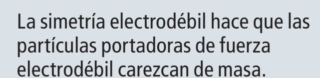
En la ruptura de la simetría, el convenio ha de ser fijado en todas partes por igual. La denominación "electrón" significa lo mismo para todos. El campo de Higgs es responsable de esta ruptura de la simetría.











La simetría electrodébil hace que las partículas portadoras de fuerza electrodébil carezcan de masa.





La ruptura de la simetría confiere masas a los bosones *W* y *Z*, y con ello limita su alcance.

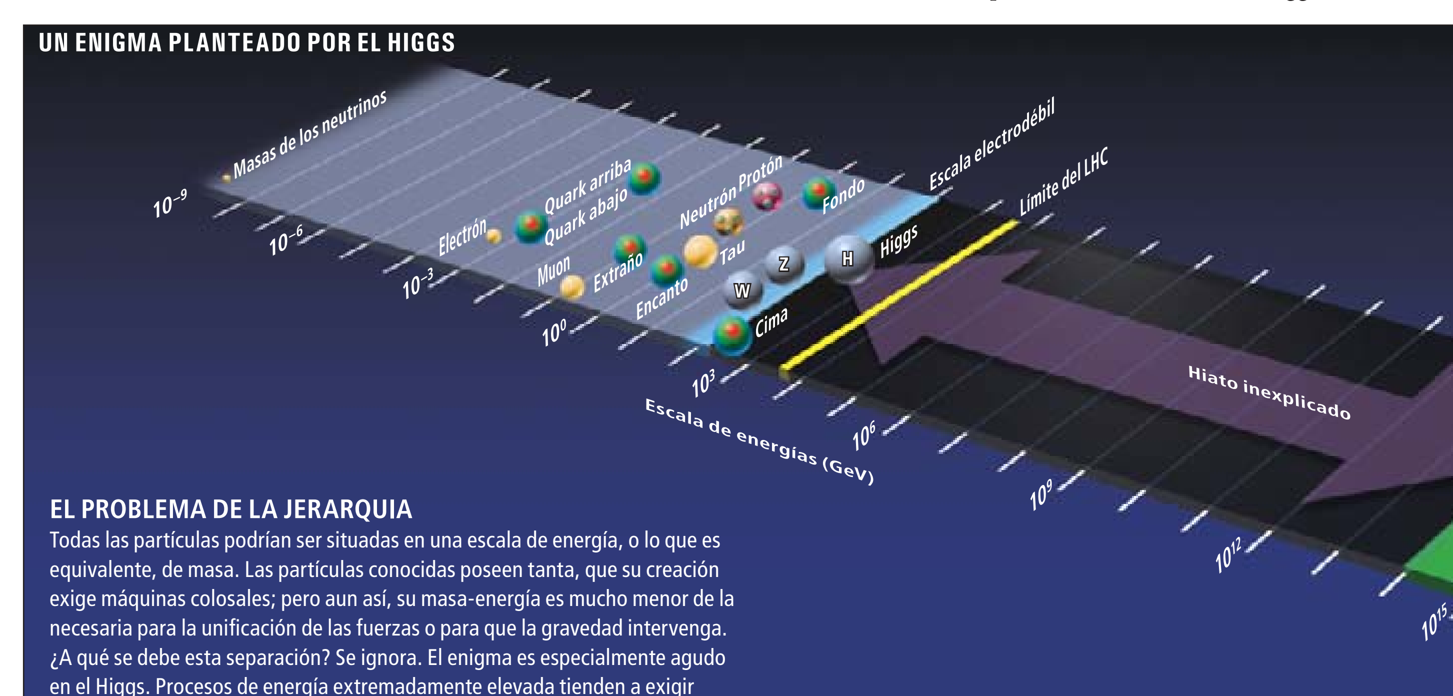
hazaña intelectual asombrosa, aunque todavía incompleta, pues si bien indica la forma de que los quarks y los leptones adquieran masa, no pronostica cuánta tendría que ser. La teoría electrodébil deja también indefinida la masa del propio bosón de Higgs: la existencia de la partícula es esencial, pero la teoría no predice su masa. Muchos de los problemas más señalados de la teoría de partículas y de la cosmología se hallan vinculados al problema de la determinación exacta de cómo se rompe la simetría electrodébil.

El modelo estándar refiere su historia

Los teóricos de los años setenta, animados por una serie de prometedoras observaciones, empezaron a tomarse el modelo estándar con la seriedad suficiente como para sondear sus límites. A finales de 1976, Benjamin W. Lee, del Laboratorio Nacional del Acelerador Fermi en Batavia, Harry B. Thacker, ahora en la Universidad del Oeste de Virginia, y quien escribe diseñaron un experimento conceptual destinado a investigar cómo se comportarían las fuerzas electrodébiles a energías muy elevadas. Imaginamos colisiones entre pares de bosones *W*, *Z* y de Higgs. Tal ejercicio podía parecer bastante fantasioso, porque cuando realizamos aquel trabajo no se había descubierto ni una sola de estas partículas. Pero los físicos tienen la obligación de poner a prueba cualquier teoría y examinar sus consecuencias como si todos sus elementos fueran reales.

Lo que observamos fue una sutil interacción entre las fuerzas generadas por estas partículas. Nuestros cálculos, que se extendieron hasta energías muy elevadas, adquirían sentido en el caso de que la masa del bosón de Higgs no

SLIM FILMS



EL PROBLEMA DE LA JERARQUIA

Todas las partículas podrían ser situadas en una escala de energía, o lo que es equivalente, de masa. Las partículas conocidas poseen tanta, que su creación exige máquinas colosales; pero aun así, su masa-energía es mucho menor de la necesaria para la unificación de las fuerzas o para que la gravedad intervenga. ¿A qué se debe esta separación? Se ignora. El enigma es especialmente agudo en el Higgs. Procesos de energía extremadamente elevada tienden a exigir que su masa exceda con mucho de 1 TeV. ¿Qué la mantiene inferior?

fuese demasiado grande: la equivalente a no más de 10^{12} electronvolt, o 1 TeV. Si la masa del bosón de Higgs resulta inferior a 1 TeV, las interacciones débiles se conservarán febles y la teoría operará fiablemente a todas las energías. Si la masa del Higgs excediese de 1 TeV, las interacciones débiles se intensificarían en el entorno de esas energías y se seguiría todo tipo de procesos de partículas exóticas. Una condición del tipo de la nuestra resulta interesante porque la teoría electrodébil no pronostica directamente la masa del Higgs.

Semejante umbral másico significa, entre otras cosas, que habrá de ser descubierto algo nuevo —sean los bosones de Higgs, o algún otro tipo de novedosos fenómenos— cuando el experimento sea transformado de conceptual en real por mediación del LHC.

No es imposible que en los experimentos se haya observado ya la influencia que el bosón de Higgs ejerce entre bastidores, sin salir a escena. Este efecto sería otra consecuencia del principio de indeterminación: las partículas de gran masa, como el bosón de Higgs, tienen una existencia demasiado efímera para la observación directa, pero esta duración sí puede ser suficiente para dejar una sutil impronta sobre los procesos de otras partículas. Con el LEP (Gran Colisionador Electrón-Positrón) del CERN, que fue el anterior inquilino del túnel donde ahora reside el nuevo colisionador de hadrones, ya se detectaron efectos de esta mano todavía invisible. Las medidas de precisión, al ser confrontadas con las previsiones teóricas, dan indicación de la existencia del Higgs, y sugieren que su masa no debe exceder de unos 192 GeV.

Que el Higgs tenga masa menor de 1 TeV, como parece necesario, entraña un curioso enigma. En la teoría cuántica, las magnitudes física, la masa entre ellas, no quedan determinadas y fijadas de una vez por todas, sino que son modificadas por efectos cuánticos. Al igual que el Higgs puede ejercer influencia sobre otras partículas sin aparecer abiertamente en escena, otras partículas podrían hacer otro tanto sobre el Higgs. Tales partículas se presentarían en una amplia gama de energías; su efecto neto dependería del punto exacto en el que el modelo estándar cediera el paso ante una teoría más profunda. Pues si el modelo estándar siguiera vigente hasta los 10^{15} GeV, nada menos que 10^{12} TeV, energía a la cual se cree que tiene lugar la unificación de las interacciones fuerte y electrodébil, partículas de energías verdaderamente titánicas actuarían sobre el Higgs y le conferirían una masa relativamente grande. ¿Por qué, pues, parece que la masa del bosón de Higgs no pasa de 1 TeV?

SLIM FILMS

Energía Planck
¿Cuerdas? ¿Gravedad cuántica?
10^{18}

A esa paradoja se la conoce por "problema de la jerarquía". Una posible solución consistiría en un precario equilibrio de sumas y restas de grandes números, correspondientes a las contribuciones antagónicas de diferentes partículas. Pero los físicos han aprendido a desconfiar de cancelaciones inmensamente precisas que no vengan ordenadas por principios más profundos. En consecuencia, y en ello concuerdo con muchos de mis colegas, me parece sumamente probable que en el LHC se descubran el bosón de Higgs y otros muchos fenómenos nuevos.

Supersimetría, tecnicolor y dimensiones adicionales

Los físicos teóricos han explorado muy diversas vías con el propósito de resolver el problema de la jerarquía y han predicho nuevos fenómenos. Entre las opciones con mayores posibilidades se halla la supersimetría, que supone que cada partícula cuenta con una superasociada, no observada aún, de la que se diferencia en espín [*véase* "¿Es supersimétrica la naturaleza?", por Howard E. Haber y Gordon L. Kane; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, agosto de 1986]. Si la naturaleza fuese exactamente supersimétrica, las masas de las partículas y las de sus superasociadas serían idénticas; sus respectivas influencias sobre el bosón de Higgs quedarían mutuamente canceladas. Mas, si tal fuera el caso, a estas alturas tendrían que haber sido observadas ya las partículas superasociadas. Pero no lo han sido. Por tanto, si existe la supersimetría, habrá de consistir en una supersimetría rota. La influencia neta sobre el bosón de Higgs todavía resultaría aceptablemente pequeña si las masas de las superasociadas no excedieran de alrededor de 1 TeV, con lo que quedarían al alcance del LCH.



SE BUSCA: NUEVA FISICA

Lo que mantiene la masa del Higgs en la vecindad de 1 TeV tiene que proceder de más allá del modelo estándar. Se han propuesto muchas soluciones hipotéticas; el Gran Colisionador de Hadrones decidirá. He aquí tres líneas prometedoras:

SUPERSIMETRIA

Lo que tiende a aumentar la masa del Higgs es su interacción con las llamadas partículas virtuales: copias de quarks, leptones y de otras partículas que se materializan temporalmente en torno al Higgs. Pero si cada partícula estuviera asociada con una superpareja, cada una compensaría a la otra y la masa del Higgs se mantendría pequeña.

TECHNICOLOR

Es posible que el bosón de Higgs no sea una auténtica partícula elemental, sino un puñado de constituyentes más fundamentales, de forma muy parecida al protón, que constituye en realidad una minigalaxia de quarks y gluones. En tal caso, la masa del Higgs sería consecuencia de la energía de sus componentes y no sería tan sensible a procesos muy energéticos que le aportasen masa.

DIMENSIONES EXTRA

Si el espacio tuviera más dimensiones que las tres que conocemos, las partículas podrían interactuar de distinta forma a grandes energías y la energía de unificación que se ha venido conjeturando no tendría que ser tan elevada como ahora se piensa. El problema de la jerarquía recibiría una nueva formulación e incluso podría desaparecer.



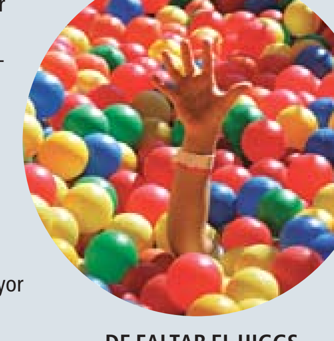
SIMETRIA OCULTA QUE DA FORMA A NUESTRO MUNDO

De no existir el mecanismo de Higgs, ¡qué diferente sería este mundo! Las partículas elementales de la materia, como los quarks y los electrones, carecerían de masa. No por ello, sin embargo, dejaría el universo de contener masa. Una de las cosas que el modelo estándar hace ver, aunque no sea suficientemente valorada, es que partículas como el protón y el neutrón constituyen materia de una clase nueva. A diferencia de lo que sucede en masas macroscópicas, la del protón procede sólo en un pequeño porcentaje de las masas de sus constituyentes (los quarks apenas aportan un 2 por ciento de la masa del protón). La casi totalidad de su masa resulta de la famosa ecuación de Einstein, $m = E/c^2$: la partícula almacena la energía correspondiente al trabajo necesario para confinar los quarks en un volumen diminuto. Al reconocer que la energía de confinamiento de los quarks es el origen de la masa del protón y del neutrón, queda explicada casi toda la masa visible del universo, porque la materia luminosa está compuesta principalmente por protones y neutrones de las estrellas.

Las masas de los quarks sí explican un importante detalle del mundo real: por qué es la masa del neutrón un poco mayor que la del protón. Se podría esperar que el protón fuese el de mayor masa de los dos porque su carga eléctrica, al contribuir a su energía intrínseca, sería una fuente de energía propia de la que el neutrón carece. Pero las masas de los quarks inclinan la balanza del lado contrario. En la zona "sin Higgs", la masa del protón sería mayor que la del neutrón. La desintegración radiactiva beta se volvería del revés. En nuestro mundo, un neutrón emitido por un núcleo se desintegra en un protón, un electrón y un neutrino en el plazo de unos 15 minutos, por término medio. Si desaparecieran las masas de los quarks, un protón libre se desintegraría en un neutrón, un positrón y un neutrino. En consecuencia, no podrían existir átomos de hidrógeno. El "núcleo" más ligero consistiría en un neutrón, no en un protón.

En el modelo estándar, el mecanismo de Higgs distingue entre el electromagnetismo y la fuerza débil. A falta del bosón de Higgs, tal diferencia sería inducida por la fuerza fuerte entre quarks y gluones. Al igual que la interacción fuerte ha confinado los quarks, con su color, en objetos sin color, como el protón, también actuaría para diferenciar las interacciones débil y electromagnética: otorgaría masas pequeñas a los bosones *W* y *Z*, y el protón quedaría desprovisto de masa. Esta manifestación de la fuerza fuerte no le concedería masa apreciable alguna al electrón ni a los quarks. Si fuese ella la que operase, en lugar de hacerlo el Higgs, la desintegración beta actuaría millones de veces más deprisa que en nuestro mundo.

En un universo temprano sin bosones de Higgs se producirían y sobrevivirían algunos núcleos ligeros, pero no llegarían a formarse átomos reconocibles por nosotros. El radio de un átomo es inversamente proporcional a la masa del electrón, por lo que, si el electrón tuviera masa nula, los átomos, cuyo diámetro, en nuestro mundo, es de menos de un nanómetro, serían infinitamente grandes. Aun cuando otros efectos le concedieran a los electrones una masa diminuta, los átomos serían macroscópicos. Un mundo sin átomos compactos sería un mundo sin reacciones químicas y falto por completo de estructuras compuestas estables, como nuestros sólidos y nuestros líquidos.



DE FALTAR EL HIGGS, los diámetros atómicos medirían decímetros o más.

UN DECENIO DE DESCUBRIMIENTOS

Muchos físicos opinan que los diez o quince últimos años han sido un período de consolidación de la física de partículas. De hecho, han sido años apasionantes, años de preparación del escenario para revoluciones venideras.

UNA NUEVA LEY DE LA NATURALEZA

La teoría electrodébil, un elemento clave del modelo estándar, ha sido verificada en numerosos experimentos y en una pasmosa gama de distancias, desde las subnucleares hasta las galácticas.

LA MASA DEL NEUTRINO

Los detectores de partículas han establecido que los distintos neutrinos pueden transmutarse entre sí. Estas escurridizas partículas han de poseer masa, cosa que el modelo estándar no explica de forma natural.

EL QUARK CIMA

El quark cima fue descubierto en experimentos del Fermilab, en colisiones entre protones y sus homólogos de antimateria, los antiprotones. El quark cima destaca porque su masa es unas 40 veces mayor que la de su pareja, el quark fondo.

UN ESPEJO IMPERFECTO

En el KEK (laboratorio japonés de física de alta energía) y en el Acelerador Lineal de Stanford (SLAC) se han detectado diferencias entre las desintegraciones de mesones B y las de sus antipartículas. Tales sutiles asimetrías explican en parte por qué el universo contiene tan poca antimateria.

FORMAS INEDITAS DE MATERIA Y ENERGIA

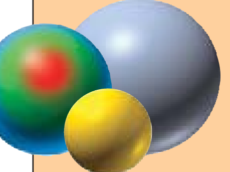
Una notable concordancia de observaciones astronómicas indica que vivimos en un universo aproximadamente plano, dominado por materia oscura y por una forma sin identificar de energía oscura, inductora de la aceleración cósmica.

Otra opción, a la que se ha dado en llamar "tecnicolor", presume que el bosón de Higgs no es una partícula fundamental genuina, sino que está integrada por constituyentes todavía no observados. (El nombre de "tecnicolor" alude a una generalización de la carga definitoria de la interacción fuerte, o "carga de color".) En tal supuesto, el bosón de Higgs no es partícula fundamental. Las colisiones a energías que ronden 1 TeV (la energía que mantiene de una pieza al Higgs) nos permitirían examinar su interior y poner de manifiesto que su naturaleza es compuesta. Con el tecnicolor, lo mismo que con la supersimetría, el LHC dejaría en libertad a toda una cohorte de partículas exóticas.

Una tercera idea, muy atrevida, sostiene que el problema de la jerarquía se esfumará al examinarlo de cerca, porque el espacio posee en realidad no sólo las tres dimensiones en las que nos movemos, sino otras adicionales. Estas dimensiones supernumerarias podrían modificar la ley que expresa la intensidad de las fuerzas en función de la energía y por la que acabarán fundiéndose entre sí. En tal caso, la fusión de las fuerzas —y la instauración de una nueva física— podría no ocurrir a 10^{12} TeV, sino a una energía mucho menor, relacionada con el

PAT LACROIX *Getty Images*

CINCO OBJETIVOS PARA EL LHC

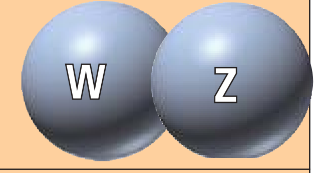


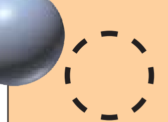
REDESCUBRIMIENTO DEL MODELO ESTANDAR

El primer objetivo del colisionador no es sondear lo nuevo, sino confirmar lo antiguo. La máquina va a producir partículas ya conocidas en número prodigioso (varios quarks cima por segundo, por ejemplo) y va a permitir escrutarlos con un detalle cada vez mayor.

DETERMINAR LA CAUSA DE LA RUPTURA DE LA SIMETRIA ELECTRODEBIL

El colisionador servirá para buscar el bosón de Higgs (o lo que haga sus funciones) y determinar sus propiedades. ¿Proveerá de masa el bosón de Higgs no sólo a las partículas Z y W, sino también a los quarks y a los leptones?





BUSQUEDA DE NUEVAS FUERZAS DE LA NATURALEZA

Las nuevas partículas de fuerza se desintegrarían en partículas conocidas, como los electrones y sus simétricos en antimateria, los positrones. Tales fuerzas darían indicación de nuevas fuerzas de la naturaleza y podrían servir para guiar a los físicos hacia una descripción unificada de todas las interacciones.

PRODUCCION DE CANDIDATOS PARA MATERIA OSCURA

El colisionador, al permitir la observación de partículas neutras y estables creadas en colisiones de gran energía, podría contribuir a la solución de uno de los mayores problemas de la astronomía y a poner a prueba nuestro conocimiento de la historia del universo.



Simulación de la materia oscura



¡Y SOBRE TODO, EXPLORAR!

El colisionador permitirá examinar un dominio nuevo e inmenso y buscar en él pruebas de dimensiones ocultas del espacio-tiempo, nuevas interacciones fuertes, la supersimetría y lo totalmente inesperado. Será preciso prestar atención a los vínculos entre las grandes cuestiones de hoy y mantenerse alerta para apreciar cuestiones nuevas que el colisionador va a suscitar.

tamaño de las dimensiones extra, quién sabe si a unos pocos TeV. En tal caso, el LHC podría abrir una rendija desde la que atisbar esas dimensiones [*véase* "Nuevas dimensiones para otros universos", por Nima Arkani-Hamed, Savas Dimopoulos y Georgi Dvali; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, octubre de 2000].

Hay todavía otro indicio que orienta hacia fenómenos nuevos en la escala de los TeV. La materia oscura que compone el grueso del contenido material del universo parece consistir en un tipo novedoso de partícula [*véase* "La búsqueda de la materia oscura", por David B. Cline; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, mayo de 2003]. Si esta partícula interactúa con la intensidad de la fuerza débil, la gran explosión la habría producido en número necesario siempre que su masa se encuentre entre 100 GeV y 1 TeV. Sea la solución del problema de la jerarquía la que fuere, es probable que sugiera una candidatura para la partícula de materia oscura.

Revoluciones en lontananza

Abierto el paso hacia las energías del orden del TeV, se podrá explorar un nuevo mundo de física experimental. La prioridad fundamental de los experimentos con aceleradores consistirá desde ese momento en la concienzuda exploración de este mundo, donde habremos de medirnos con la ruptura de la simetría electrodébil, el problema de jerarquía y la materia oscura. Los objetivos están debidamente justificados y al alcance de nuestros instrumentos experimentales, ahora que el LHC va a superar las limitaciones del Tevatrón del Fermilab. Las respuestas que nos proporcione no sólo serán satisfactorias para la física de partículas, sino que nos permitirán también profundizar en nuestra comprensión del mundo que nos rodea.

Pero el cuento no acaba con estas expectativas, por altas que ya sean sus miras. El LHC podría facilitarnos pistas conducentes a la plena unificación de fuerzas o indicaciones de que las masas de las partículas obedecen una pauta racional [*véase* "La unificación de la física", por Steven Weinberg; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, enero de 2000]. Cualquier interpretación que se proponga de partículas nuevas, tendrá consecuencias para desintegraciones raras de las partículas que conocemos. Es muy probable que, alzado el velo de la interacción electrodébil, resulte posible apreciar con más claridad el perfil de estos problemas, cambiar nuestra forma de concebirlos y obtener inspiración para futuros avances experimentales.

SLIM FILMS (*ilustración*); ANDREY KRAVTSOV (*materia oscura*)

Bibliografía complementaria

LHC PHYSICS: THE FIRST ONE-TWO YEAR(S). F. Gianotti y M. Mangano en *Proceedings of the 2nd Italian Workshop on the Physics of Atlas and CMS*, págs. 3-26. Dirigido por G. Carlino y P. Paolucci. Fracati Physics Series, vol. 38; 2005.

PARTICLES AND THE STANDARD MODEL. CHRIS QUIGG IN THE NEW PHYSICS FOR THE TWENTY-FIRST CENTURY. Dirigido por Gordon Fraser. Cambridge University Press, 2006.

EL PROXIMO COLISIONADOR LINEAL

Para penetrar en la complejidad de las partículas de alta energía se necesita un colisionador electrón-positrón más potente

Barry Barish, Nicholas Walker y Hitoshi Yamamoto

CONCEPTOS BASICOS

- Parece lógico que al Gran Colisionador de Hadrones (LHC) le suceda el Colisionador Lineal Internacional (ILC), que hará que choquen entre sí electrones y positrones.
- El diseño del ILC requiere dos aceleradores lineales de 11,3 kilómetros de longitud. Acelerarían las partículas mediante unos campos eléctricos intensos a través de una cadena de "cavidades", cámaras de vacío.
- Además de superar los obstáculos técnicos, los ingenieros del ILC han de asegurar la financiación del proyecto y elegir un emplazamiento donde pueda edificarse el colisionador.

El Gran Colisionador de Hadrones (LHC), del CERN, cuya entrada en funcionamiento está muy cercana, marcará una nueva era de la física al extender la investigación de las partículas subatómicas a energías de magnitud sin precedente. Pero aun antes de las primeras colisiones de alta energía en el gigantesco anillo enterrado bajo la frontera franco-suiza, se trabaja ya en concebir un nuevo gran acelerador de partículas. Los físicos de partículas han propuesto un ingenio llamado Colisionador Lineal Internacional (ILC, *International Linear Collider*), instalación de más de 30 kilómetros de longitud en la que se harían chocar entre sí electrones y positrones a velocidades muy cercanas a la de la luz. (El positrón, e^+, es la antipartícula del electrón, de masa igual y carga opuesta.)

Mucho más potente que los anteriores colisionadores electrón-positrón, el ILC proseguiría la investigación de cualquier hallazgo de peso del LHC. El LHC está diseñado para estudiar las colisiones entre protones; cada protón consta de un racimo de tres quarks enlazados por gluones (partículas en las que reside la interacción nuclear fuerte). Como los quarks y gluones de un protón se mantienen en constante interacción, la colisión protón-protón presenta una complejidad intrínseca. No es posible saber con certeza la energía de un quark en el momento de la colisión; resulta, por tanto, difícil determinar las propiedades de las nuevas partículas que produzca el impacto. El electrón y el positrón son, por el contrario, partículas fundamentales, no compuestas: el colisionador electrón-positrón permitirá, pues, conocer con gran precisión la energía liberada en cada choque. Esta posibilidad convertirá el ILC en un instrumento sumamente útil para la medición exacta de las masas y otras características de las partículas recién descubiertas (*véase el recuadro* "El martillo y el escalpelo").

Más de 1600 científicos e ingenieros, en casi 300 laboratorios y universidades de todo el mundo, trabajan hoy en el diseño del ILC y en el desarrollo de los detectores que analizarán las colisiones de partículas en su interior. En febrero de 2007 nuestro grupo de diseño estimó en 6700 millones de dólares (4400 millones de euros) el coste del colisionador, sin incluir los detectores. Hemos estimado los costes de instalación del ILC en tres lugares diferentes: el CERN, laboratorio europeo de física de partículas cercano a Ginebra, el Laboratorio Nacional del Acelerador Fermi en Batavia y las montañas de Japón. Estamos preparando planes para gobernar un laboratorio realmente internacional. Aunque el precio a



1. ELEMENTO BASICO en el diseño del Colisionador Lineal Internacional es una cavidad de niobio de un metro de largo, compuesta de nueve células en forma de cuentas. Enfriada a temperaturas bajísimas, la cavidad se torna superconductora y puede generar eficazmente los campos eléctricos necesarios para acelerar los electrones y positrones.

FERMILAB VISUAL MEDIA SERVICES

pagar por el ILC parezca elevado, viene a ser equiparable a lo que cuestan grandes proyectos científicos como el LHC y el reactor de fusión nuclear ITER. Si se cumple lo previsto, el Colisionador Lineal ILC podría empezar a iluminar los confines de la física de partículas en la década de 2020.

La génesis de un colisionador

En agosto de 2005, unos 600 físicos de todo el mundo se reunieron en Snowmass, para iniciar un plan de desarrollo del ILC. Pero el comienzo real del proyecto se remonta a 1989, cuando entró en servicio el gran acelerador colisionador de electrones-positrones (LEP) del CERN. Allí los electrones y positrones se aceleraban en un anillo de 27 kilómetros de circunferencia y se hacía que colisionasen, con la liberación consiguiente de energías de hasta 180 gigaelectronvolt (180×10^9 volt). Era evidente que, para alcanzar energías del orden de billones de electronvolt (TeV, 10^{12} electronvolt), un LEP necesitaría varios cientos de kilómetros de circunferencia. Su coste sería totalmente prohibitivo.

El principal inconveniente del almacenamiento en anillo estriba en la radiación sincrotrónica: las partículas ligeras, como los electrones y positrones, radian con facilidad energía a medida que describen su trayectoria constantemente curvada por los numerosos imanes dipolares del anillo. Dado que esas pérdidas dificultan cada vez más la aceleración de las partículas, el coste de construir un colisionador de este tipo será proporcional al cuadrado de la energía de colisión; una máquina que duplique las energías del LEP costaría cuatro veces más. (Las pérdidas de energía no son tan graves en colisionadores que aceleran partículas más pesadas, como los protones; por eso se utiliza ahora en el LHC el túnel excavado para el anillo LEP.)

Un colisionador lineal da mejor rendimiento económico, ya que se evita la radiación sincrotrónica al acelerar las partículas en una trayectoria recta y no en un anillo. En el ILC, dos aceleradores lineales (*linacs*), uno para electrones y otro para positrones, de 11,3 kilómetros de longitud, apuntarían en sentidos opuestos hacia un punto de colisión

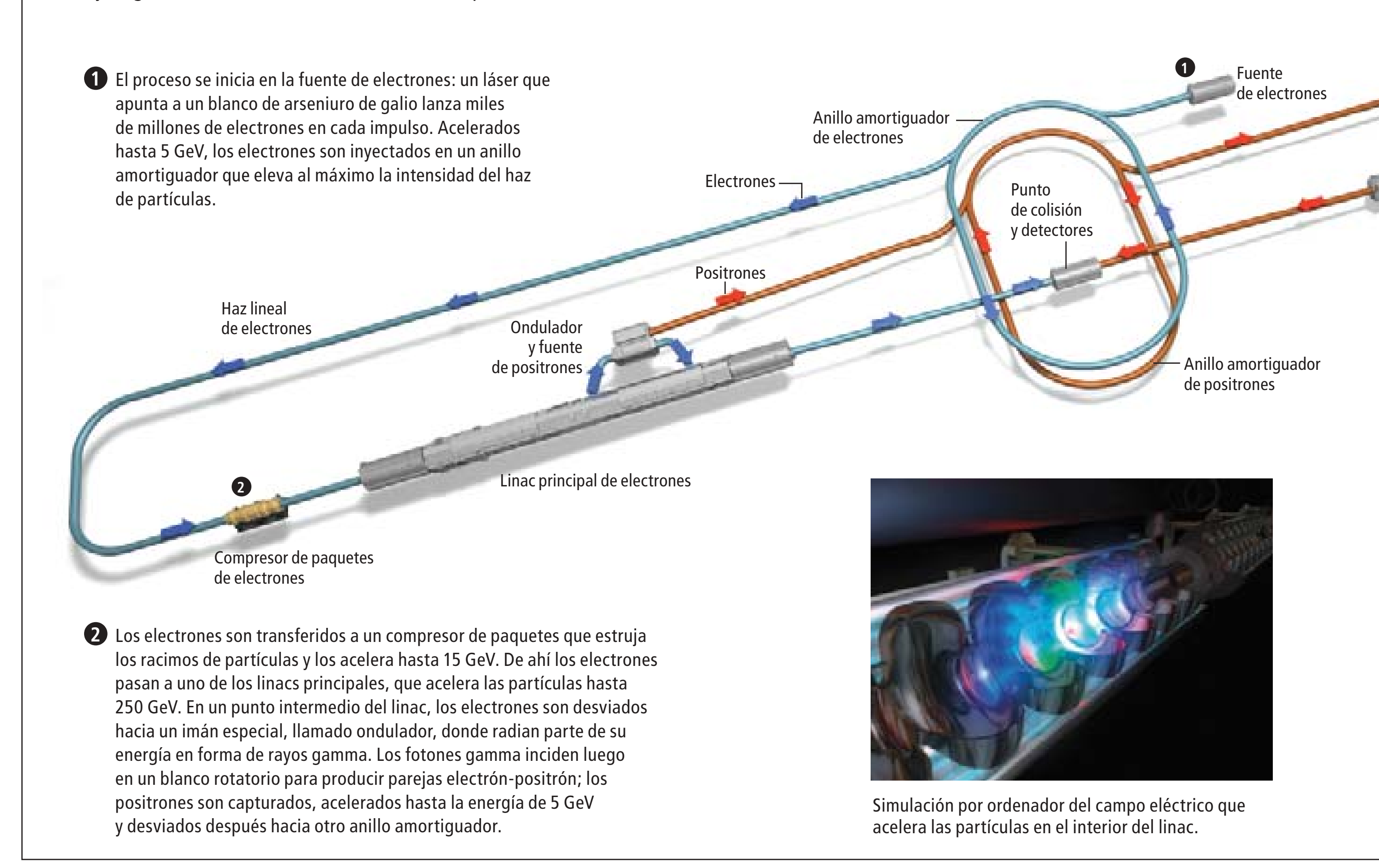
central. Lo malo es que, en cada impulso de la máquina, los electrones y positrones han de acelerarse desde el reposo hasta la energía de colisión, en vez de ir ganando velocidad en cada vuelta al anillo. Para conseguir energías de colisión superiores, basta con dar mayor longitud a los aceleradores lineales. El coste de la instalación es directamente proporcional a la energía de impacto, lo que confiere una clara ventaja, en la escala de los TeV, a los aceleradores lineales frente a los que acumulan energía en anillo.

Al tiempo que en Europa se construía el LEP, el Departamento de Energía de EE.UU. preparaba una instalación competidora en el Centro del Acelerador Lineal de Stanford (SLAC, por sus siglas en inglés). Este ingenio, planteado como una demostración de la viabilidad de los colisionadores lineales, utilizaba un acelerador lineal de tres kilómetros de largo para acelerar en cascada paquetes de electrones y positrones y elevar así su energía hasta cerca de 50 GeV. A partir de ahí, los paquetes eran separados magnéticamente y sometidos a una trayectoria circular que los llevaba a colisionar frontalmente. El dispositivo del SLAC funcionó de 1989 a 1998: no era exactamente un colisionador lineal, pues sólo utilizaba un acelerador, pero sí allanó el camino hacia el gran ILC.

El proyecto de un colisionador lineal en la escala de los TeV se emprendió de verdad a finales de los ochenta y principios de los noventa. El objetivo fundamental de las diferentes propuestas, a lo largo de su elaboración en los años noventa, fue siempre conseguir una máquina de coste asequible. Por último, en agosto de 2004, un grupo de 12 expertos independientes evaluó las soluciones técnicas propuestas y recomendó un diseño original del grupo TESLA, formado por científicos de más de 40 instituciones y coordinado por el centro investigador DESY de Hamburgo. Según ese diseño, los electrones y positrones recorrerían

EL COLISIONADOR DEL FUTURO

El ILC, de más de 30 kilómetros de largo, sería el más potente colisionador lineal jamás construido. Sus aceleradores lineales, *linacs*, impulsarían los electrones (*en azul*) y los positrones (*en naranja*) hasta energías de 250 gigaelectronvolt (GeV) y luego harían chocar entre sí ambos haces de partículas.



1 El proceso se inicia en la fuente de electrones: un láser que apunta a un blanco de arseniuro de galio lanza miles de millones de electrones en cada impulso. Acelerados hasta 5 GeV, los electrones son inyectados en un anillo amortiguador que eleva al máximo la intensidad del haz de partículas.

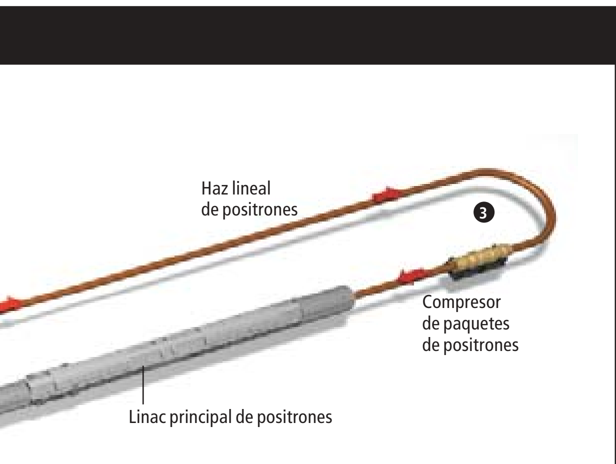
2 Los electrones son transferidos a un compresor de paquetes que estruja los racimos de partículas y los acelera hasta 15 GeV. De ahí los electrones pasan a uno de los linacs principales, que acelera las partículas hasta 250 GeV. En un punto intermedio del linac, los electrones son desviados hacia un imán especial, llamado ondulador, donde radian parte de su energía en forma de rayos gamma. Los fotones gamma inciden luego en un blanco rotatorio para producir parejas electrón-positrón; los positrones son capturados, acelerados hasta la energía de 5 GeV y desviados después hacia otro anillo amortiguador.

Simulación por ordenador del campo eléctrico que acelera las partículas en el interior del linac.

una larga serie de cavidades, cámaras de vacío. Estas cavidades, construidas del metal niobio, se tornan superconductoras al ser enfriadas a temperaturas extremadamente bajas. Esa característica permite generar con eficacia un intenso campo eléctrico en el interior de las cavidades; oscilaría a frecuencias cercanas a un gigahertz y aceleraría las partículas hacia el punto de colisión.

El elemento esencial de este dispositivo superconductor en radiofrecuencia (SCRF) es una cavidad de niobio de un metro de longitud, compuesta por nueve células susceptibles de enfriarse hasta una temperatura de dos kelvin (–271 grados Celsius). Ocho o nueve cavidades unidas en cadena se sumergen en helio líquido ultrafrío dentro de un depósito, el "criomódulo" (*véase la figura 2*). Cada uno de los dos aceleradores lineales principales del ILC necesitaría alrededor de 900 criomódulos; en total, el colisionador tendría unas 16.000 cavidades. Los investigadores del DESY llevan construidos 10 criomódulos prototipo, cinco de ellos actualmente instalados en FLASH, un láser de DESY que utiliza electrones de alta energía. La superconducción en radiofrecuencia constituirá también la base del próximo láser de rayos X de electrones libres (XFEL), que alineará 101 criomódulos para formar un linac superconductor capacitado para acelerar electrones hasta energías de 17,5 GeV.

Es posible conseguir aceleradores lineales más cortos —y por tanto de menor coste— si las cavidades generan campos eléctricos de mayor intensidad. Los diseñadores se han fijado una meta ambiciosa: mejorar la prestación del sistema SCRF hasta que entregue a las partículas una energía de 35 MeV (millones de electronvolt) por cada metro de recorrido. Varias cavidades prototipo han superado ya esa meta, pero la fabricación masiva sigue planteando grandes dificultades. Para obtener una alta calidad es esencial que la superficie interior de la cavidad se halle impoluta y libre de imperfecciones. Lo mismo la preparación que la instalación de las cavidades en los criomódulos se han de realizar en ambientes de sala blanca.





3 Los positrones se desplazan hasta el extremo opuesto del ILC, donde son comprimidos y acelerados hasta 250 GeV por el otro linac principal. Unas lentes magnéticas enfocan los haces de electrones y positrones en su carrera hacia el choque frontal. En el punto de colisión hay detectores que analizan las partículas arrojadas por los impactos de alta energía.

DON FOLEY (*esquema del colisionador*); DESY HAMBURG (*simulación del campo eléctrico*)

El Colisionador Lineal, en pocas palabras

El grupo diseñador ha establecido ya los parámetros básicos del ILC (*véase el recuadro* "El colisionador del futuro"). Medirá unos 31 kilómetros de largo, en su mayor parte ocupados por los dos aceleradores lineales superconductores que provocarán colisiones electrón-positrón con energías de 500 GeV. (Un electrón y un positrón que se mueven en sentidos opuestos con energías de 250 GeV colisionan frontalmente liberando una energía de 500 GeV.) A una cadencia de cinco veces por segundo, el ILC generará, acelerará y hará colisionar casi 3000 paquetes de electrones y positrones en un impulso de un milisegundo de duración, lo que representa una potencia media total próxima a 10 megawatt por cada haz. El rendimiento global de la máquina —la fracción de la potencia eléctrica que se convierte en potencia del haz— rondará el 20 por ciento, de manera que los dos linacs necesitarán en total unos 100 megawatt de potencia eléctrica para acelerar las partículas.

El haz de electrones se produce cuando el láser apunta a un blanco de arseniuro de galio; en cada impulso lanza miles de millones de electrones. Estas partículas tendrán el espín polarizado —sus ejes de rotación apuntarán a una misma dirección—, propiedad importante para numerosas investigaciones de la física de partículas. Los electrones serán acelerados con rapidez en un linac SCRF corto hasta alcanzar

Los autores

Barry Barish, Nicholas Walker y **Hitoshi Yamamoto** son destacados expertos en colisiones electrón-positrón. Barish dirige el grupo mundial de diseño del Colisionador Lineal Internacional (ILC) y es profesor emérito del Instituto de Tecnología de California; se interesa por campos muy diversos, desde los neutrinos hasta los monopolos magnéticos y las ondas gravitatorias. Walter, físico en aceleración de partículas en el DESY de Hamburgo, ha trabajado 15 años en diseño de aceleradores lineales y es uno de los tres responsables de la fase de diseño de ingeniería del ILC. Yamamoto, profesor de física de la Universidad Tohoku, ha trabajado en pruebas de colisiones en el Centro del Acelerador Lineal de Stanford, el Anillo de Almacenamiento de Electrones de Cornell y la Organización de Investigación de Aceleradores de Alta Energía de Japón (KEK).

ELECCION DE EMPLAZAMIENTO

Se han analizado los costes de ubicar el colisionador en tres posibles lugares:

EUROPA
En el CERN, laboratorio europeo de física de partículas cercano a Ginebra.

EE.UU.
En el Laboratorio del Acelerador Nacional Fermi, en Batavia.

JAPON
En una cadena montañosa no especificada dentro del país.

El martillo y el escalpelo

La relación complementaria existente entre el Gran Colisionador de Hadrones (LHC) y el propuesto Colisionador Lineal Internacional (ILC) se entiende si asimilamos el primero a un martillo que parte una nuez y el segundo a un escalpelo que fragmenta cuidadosamente el fruto interior. El LHC acelerará los protones hasta energías de siete billones de electronvolt (TeV), con lo que cada colisión frontal entre protones liberará un total de 14 TeV y ofrecerá una primera visión directa de la física en esa escala energética. Las colisiones tal vez generen partículas cuya existencia se predice pero que no han podido observarse todavía.

Una de ellas es el bosón de Higgs. (Según el modelo estándar —teoría generalmente aceptada de la física de partículas que explica el electromagnetismo y las interacciones nucleares débiles y fuertes— este bosón sería el causante de la masa de todas las demás partículas.) Otros ejemplos son las hipotéticas partículas supersimétricas, que estarían asociadas a las partículas conocidas. (La asociada al electrón, por ejemplo, se llamaría selectrón, y fotino la que se asocia al fotón.)

Además, el LHC podría descubrir indicios de dimensiones espaciales solamente detectables mediante la observación de eventos de elevada energía.

Si existe el bosón de Higgs, los físicos esperan que el LHC lo detecte, mida su masa y determine su interacción con otras partículas. Pero la ciencia no podrá especificar en detalle las propiedades de Higgs a partir de las desordenadas colisiones de protón a protón. Se necesitará la mayor precisión del ILC para medir características importantes, como la intensidad de las interacciones de Higgs. Esta información será de inestimable valor, pues demostraría la validez del modelo estándar: es decir, si describe correctamente los eventos de alta energía o, por el contrario, hace falta recurrir a otras teorías.

Las investigaciones de partículas supersimétricas en el ILC podrían también ayudar a los físicos a desmenuzar los detalles de nuevas teorías. Los resultados tal vez revelen si algunas de estas partículas podrían constituir la denominada "materia oscura", en la que reside la cuarta parte del contenido de energía del universo.

Otra partícula más que podría descubrir el LHC es el hipotético bosón Z-prima, un duplicado del bosón Z, que es uno de los portadores de la interacción nuclear débil. Dado que el hallazgo de la partícula Z-prima indicaría la existencia de una nueva fuerza fundamental de la naturaleza, los físicos tendrían gran interés en determinar las propiedades y orígenes de esta fuerza, su relación con las demás fuerzas dentro de un marco unificado y la función que desempeñó en los primeros momentos de la gran explosión. El ILC podría intervenir decisivamente en el tratamiento de estos temas. Por último, si algo nos enseña la historia, parece muy probable que el LHC y el ILC descubran nuevos fenómenos no previstos que al menos igualen en interés e importancia a los ya examinados.

LA SIMULACION INFORMATICA de una colisión electrón-positrón en el ILC muestra los residuos de partículas desprendidas desde el punto de choque. Cada diminuto cuadrado indica un impacto en uno de los detectores de la máquina; un grupo de cuadrados del mismo color representa un aluvión de partículas. A partir de estos datos se deduce la naturaleza de las partículas emergentes: las líneas amarillas señalan trayectorias de partículas neutras (fotones, en su mayoría), y las azules indican partículas cargadas (fundamentalmente piones, formados por parejas de quarks). La simulación predice lo que verían los investigadores si la colisión electrón-positrón produjera un bosón de Higgs y un bosón *Z*: ambos se degradarían con rapidez en partículas más ligeras.

NORMAN GRAF

5 GeV de energía. Se inyectarán luego en un anillo de almacenamiento de 6,7 kilómetros, en el centro de la instalación. Al circular los electrones y emitir radiación sincrotrónica, se amortiguan los paquetes de partículas; es decir, disminuye su volumen y crece su densidad de carga, con el aumento consiguiente de la intensidad del haz.

Cuando los paquetes de electrones salgan del anillo amortiguador al cabo de 200 milisegundos, cada uno medirá unos nueve milímetros de largo y será más fino que un cabello humano. A continuación, se los comprimirá aún más, hasta una longitud de 0,3 milímetros, para optimizar su aceleración y la dinámica de las colisiones subsiguientes con los paquetes de positrones que les correspondan en el interior del detector. Durante la compresión, los paquetes elevarán su energía hasta 15 GeV, tras lo cual serán inyectados en uno de los aceleradores lineales SRCF principales de 11,3 kilómetros y acelerados hasta 250 GeV.

En un punto intermedio del acelerador lineal, donde las partículas tendrán 150 GeV de energía, los paquetes de electrones harán un pequeño rodeo para producir los paquetes de positrones. Los electrones se desviarán a un ondulador, un imán especial donde parte de su energía se convertirá en radiación gamma. Los fotones gamma se enfocarán sobre un blanco formado por una delgada placa de aleación de titanio. Esta placa gira a unas 1000 revoluciones por minuto y los impactos fotónicos que reciba producirán un gran número de parejas electrón-positrón. Se capturarán los positrones, se los acelerará hasta 5 GeV, se los transferirá a otro anillo amortiguador y se los enviará finalmente a otro linac SRCF, situado en el extremo opuesto del colisionador ILC.

Ya plenamente acelerados los electrones y positrones hasta 250 GeV, convergiendo con rapidez hacia el punto de colisión, una serie de lentes magnéticas concentrará los paquetes de alta energía en haces con forma de cinta plana, de unos 640 nanómetros de ancho y seis nanómetros de alto. Después de las colisiones, los paquetes se extraerán de la región de interacción y se llevarán a un blanco, el "amortiguador de haz", que absorberá las partículas y disipará su energía con entera seguridad.

Cada uno de los subsistemas del ILC pondrá a prueba las posibilidades técnicas y la ingeniería afrontará grandes desafíos. Los anillos amortiguadores del colisionador deben lograr haces de calidad



2. LOS CRIOMODULOS sumergen en helio líquido la cadena de cavidades de niobio del ILC para enfriarlas hasta el estado de superconducción. Los aparatos que se ven aquí se ensayaron en el centro de investigación DESY de Hamburgo.

varias veces superior a la que actualmente consiguen los anillos de almacenamiento de electrones. Y más aún: esa calidad debe mantenerse durante las etapas de compresión, aceleración y enfoque. La máquina necesitará procedimientos de diagnosis refinados, avanzadas técnicas de ajuste de haces y una alineación muy precisa de sus componentes. Construir el sistema de producción de positrones y dirigir hacia el punto de colisión unos haces de dimensiones nanométricas serán tareas exigentes y laboriosas.

También costará esfuerzo el desarrollo de detectores que analicen las colisiones dentro del ILC. Para determinar, por ejemplo, la intensidad de las interacciones entre el bosón de Higgs y otras partículas, los detectores deberán medir la cantidad de movimiento y los puntos de creación de las partículas cargadas con resoluciones que mejoren en un orden de magnitud las de los dispositivos anteriores. Actualmente se trabaja sobre nuevos sistemas de seguimiento y calorimetría que permitan aprovechar plenamente los abundantes hallazgos físicos del colisionador lineal ILC.

Las próximas etapas

Aunque el diseño ya esté decidido, el proyecto del colisionador lineal exige trabajar mucho más. En los años venideros, mientras el gran colisionador de hadrones (LHC) va recogiendo y analizando datos de las colisiones protón-protón, nos esforzaremos por optimizar el diseño del ILC con miras a asegurar que se obtenga la mejor calidad funcional a un coste razonable. Ignoramos todavía dónde se ubicará el ILC. La decisión está muy condicionada por el apoyo financiero que los respectivos gobiernos se muestren dispuestos a conceder al proyecto. Por el momento, seguiremos estudiando posibles emplazamientos del ILC en Europa, Estados Unidos y Japón. Las diferencias en geología y topografía, normas y regulaciones pueden conducir a distintas modalidades de construcción y estimaciones de coste. En último término, numerosos detalles de diseño del colisionador dependerán de la localización precisa en que se instale.

Sea como fuere, nuestra planificación nos permitirá avanzar a pleno ritmo en cuanto los hallazgos científicos del LHC revelen a qué objetivos óptimos se ha de orientar la investigación. En paralelo con el diseño técnico, estamos creando modelos para repartir la dirección del proyecto ILC de manera que cada grupo de físicos tenga participación. Sin duda alguna, este ambicioso empeño ha sido mundial en su idea, desarrollo y diseño, y esperamos que sea enteramente internacional también en su construcción y funcionamiento.

DESY HAMBURG (*criomódulo*); DESY (*cavidad superconductora TESLA*)

Cada subsistema del Colisionador Lineal Internacional pondrá a prueba las posibilidades técnicas y planteará grandes desafíos a la ingeniería.

Bibliografía complementaria

Puede ampliarse la información sobre diseño, física y técnicas del Colisionador Lineal Internacional en:

www.linearcollider.org

www.linearcollider.org/gateway

www.linearcollider.org/cms/?pid=1000437

www.fnal.gov/directorate/icfa/ITRP_Report_Final.pdf

http://physics.uoregon.edu/%7Elc/wwstudy/lc_consensus.html

Mortalidad del krill antártico

Verónica Fuentes y Alejandro Olariaga

En la península Antártica se ha observado en el último lustro un aumento de la temperatura cifrado en torno a los 2,5 ºC. En respuesta a ese cambio climático, se ha producido un retroceso de los glaciares y un incremento en la producción de agua de derretimiento, con el consiguiente aporte de una gran cantidad de sedimentos a las aguas costeras. Cada vez con mayor frecuencia, durante el verano antártico las aguas costeras de la caleta Potter toman una intensa coloración pardusca. En numerosas ocasiones, coincidiendo con la presencia de esa marea marrón, se han detectado en la playa franjas anaranjadas. De cerca, descubrimos que se trata de acumulaciones de krill (*Euphausia superba*) muerto.

Los bancos de krill llegan a la costa para alimentarse del abundante fitoplancton que medra en las aguas someras. Cuando filtra el agua para así concentrar el alimento, el krill capta también partículas de sedimento que se encuentran en suspensión. Esos sedimentos, de composición sobre todo inorgánica, no constituyen un alimento para el krill. Más bien al contrario. Se cree que le impiden alimentarse con normalidad, hasta terminar por causarle la muerte. En la base científica Jubany/Dallmann se están llevando a cabo investigaciones para desentrañar esas muertes masivas de krill y su relación con el cambio climático.



2. Aporte de sedimentos del glaciar Collins a la caleta Potter a través de los ríos de deshielo.



1. Vista panorámica de la caleta Potter y el cerro Tres Hermanos. Isla 25 de Mayo, Antártica.

3. Costa de la caleta Potter donde se encuentra la base científica argentina Jubany y el laboratorio alemán Dallmann. Se observan las líneas anaranjadas que aparecieron en repetidas ocasiones durante el verano antártico de 2006-2007.



4 . Krill muerto en la costa de la caleta Potter, enero de 2007.

VERONICA FUENTES Y ALEJANDRO OLARIAGA (*ilustraciones*)

Crisis en las regiones áridas

Las soluciones económicas ofrecen a las naciones en vías de desarrollo el camino más fiable para la paz

Jeffrey D. Sachs

La vasta región de desiertos, praderas y ralos bosques que se extienden a lo largo del Sahel, el cuerno de Africa, Oriente Medio y Asia Central es, con diferencia, la más conflictiva del planeta. Con excepción de unos pocos estados prósperos del golfo Pérsico, los países de esas regiones áridas se enfrentan a dificultades cada vez mayores; entre ellas, frecuentes y mortíferas sequías, desiertos que avanzan, incrementos de la población y extrema pobreza. La región se caracteriza por ocupar el último lugar en el Indice de Desarrollo Humano de las Naciones Unidas, que evalúa a los países según sus ingresos, esperanza de vida y resultados educativos.

La consecuencia de estas desesperadas condiciones de vida es que en estos países de las regiones áridas se da una concentración desproporcionada de conflictos violentos con respecto al resto del mundo. Si observamos más de cerca la violencia en Afganistán, Chad, Etiopía, Irak, Pakistán, Somalia y Sudán, descubrimos sociedades tribales y, con frecuencia, de pastores, que luchan por superar crisis ecológicas cada vez más profundas. La escasez de agua, en concreto, se ha convertido en fuente de conflictos territoriales al fallar el sistema tradicional de gestión de tierras debido al crecimiento de la población, el aumento de la temperatura y el descenso de las precipitaciones.



Cuando Washington examina muchos de estos enfrentamientos, erróneamente ve ideología islamista de fondo. Nuestros dirigentes políticos no reparan en que hay otras poblaciones islámicas mucho más estables en términos económicos, políticos y sociales, ni en que la raíz de la crisis de los países de las regiones áridas no es el Islam, sino la extrema pobreza y el estrés ambiental.

Washington, en su modo de pensar, prefiere también el enfoque militarista al desarrollo. Estados Unidos ha apoyado al ejército etíope en una incursión militar en Somalia. Ha presionado para que sean las fuerzas militares las que frenen la violencia en Darfur. Ha armado a los clanes del desierto del oeste de Irak y ahora propone armar a los clanes de pastores de Pakistán a lo largo de la frontera afgana.

El problema del enfoque militarista estriba en su altísimo coste. Mas ni con eso aborda ninguno de los problemas subyacentes. Es más, a menudo las armas norteamericanas suministradas a los clanes locales acaban siendo utilizadas más tarde contra los propios EE.UU. Resulta revelador que uno de los mayores impedimentos para destinar las tropas de paz propuestas a Darfur sea la carestía de agua. Dada la dificultad de encontrar agua para esos 26.000 soldados, se hace más fácil comprender la gravedad de la continua e irresuelta crisis del agua que enfrentan los entre cinco y siete millones de residentes de Darfur.

Afortunadamente, existen soluciones mucho mejores una vez que se presta entera atención al cuidado del desarrollo sostenible. Actualmente, hay muchas técnicas probadas de acopio de agua de lluvia para uso humano, ganado o cereales. En algunas zonas se podría incrementar la disponibilidad de agua con perforaciones que exploten los acuíferos subterráneos; en otras, se podría utilizar el caudal de los ríos y los residuos superficiales del agua estacional para riego.

Este tipo de soluciones puede costarles a las familias cientos de dólares durante años. Es un desembolso excesivo para los pobres, pero supone mucho menos de lo que cuestan las sociedades en conflicto y las intervenciones militares. Lo mismo podemos predicar de otras intervenciones de bajo coste para combatir las enfermedades, escolarizar a los niños y asegurar una alimentación básica.

Para acabar con la trampa de la pobreza, los pastores pueden incrementar la productividad del ganado mejorando la raza, los cuidados veterinarios y una gestión científica del pienso. Los pastores podrían multiplicar sus ingresos vendiendo animales enteros, productos cárnicos, bienes procesados (como cueros) y derivados lácteos. Los estados ricos de Oriente Medio pueden ser un mercado cercano y lucrativo para la ganadería de Africa y Asia Central.

Para la creación de ese mercado de exportación, las economías de pastores necesitarán ayuda, con carreteras para todo tipo de climas, lugares de almacenaje, cobertura de teléfonos móviles, electricidad, cuidados veterinarios y asesoramiento técnico, por mencionar sólo algunas de estas inversiones clave. Con el apoyo decisivo y el compromiso activo del sector privado, las sociedades de las regiones pobres podrán beneficiarse de las técnicas de comunicación transformadoras e incluso conseguir acceso a capital extranjero.

La crisis actual de las regiones áridas de Africa y Asia Central afecta al mundo entero. Estados Unidos debería repensar su insistencia en el enfoque militarista y Europa tendría que desarrollar los compromisos incumplidos de ayuda a esta región. Otras naciones —entre ellas los países ricos de Oriente Medio y nuevos donantes como India y China— pueden también ayudar a cambiar las tornas. El desarrollo sostenible será la única vía fiable para la paz en las vastas y conflictivas regiones áridas.

Jeffrey D. Sachs es director del Instituto de la Tierra de la Universidad de Columbia.

MATT COLLINS

La esferificación

Mediante un fino control de la gelificación, se obtienen texturas que abren nuevas vías a la gastronomía

Pere Castells

Transformadas en auténticos laboratorios, las cocinas de los restaurantes vanguardistas explotan los conocimientos que la química y la física ofrecen a la gastronomía. Una de las últimas aplicaciones de esa nueva ciencia culinaria es la esferificación: la transformación de un alimento en esferas líquidas. Aunque las preparaciones esferificadas pertenecen todavía al dominio de la cocina experimental, los lectores aficionados a la alta gastronomía a buen seguro habrán oído hablar de ellas; los más afortunados las habrán degustado.

¿Qué fenómenos fisicoquímicos subyacen bajo la esferificación? Hallamos la respuesta en la gelificación. Si añadimos un gelificante al producto original y le aplicamos luego un baño de una sal de calcio, provocaremos la formación, durante un lapso de tiempo limitado, de pequeñas esferas. En la superficie de éstas se crea una estructura de tipo "huevera", con dos capas "onduladas" de gelificante que encierran una hilera de átomos de calcio. El interés de las esferas engendradas reside, sobre todo, en la combinación de texturas que ofrecen: gelificadas por fuera y líquidas por dentro, producen en la boca una agradable sensación de "explosión".

La primera aplicación gastronómica de la esferificación se realizó en 2003. Se prepararon "caviar" de melón y "raviolis" de guisantes. Por gelificante se utilizó alginato de sodio. Los alginatos presentan una velocidad de gelificación elevada, no requieren calor, ni cambios bruscos de temperatura y se disuelven con facilidad. Todo ello los convierte en grandes aliados de la industria alimentaria; se aplican como gelificantes, espesantes y estabilizantes. Se obtienen a partir de algas pardas (feofíceas) deshidratadas. El alginato de sodio se extrae de algas de los géneros *Macrocystis*, *Fucus*, *Laminaria* y *Ascophyllum*.

Dado que la composición de los alimentos es compleja y variada, la aplicación de la esferificación a la gastronomía entraña varias dificultades y retos para el químico. Si el alimento presenta una acidez elevada (*p*H inferior a 4), se forma ácido algínico, que arruina la gelificación. Para reducir la acidez, se añade citrato de sodio. (Sin embargo, al ser una base débil, no sirve para alimentos muy ácidos, como los cítricos o la piña.) El citrato favorece la captación del calcio que contiene el alimento mediante la formación de citrato de calcio, lo que repercute en un producto más líquido. Se obtiene así mayor contraste entre la parte gelificada y la parte líquida. Mediante esa técnica hemos preparado "raviolis" de mango, cuyo aspecto recuerda una yema de huevo.

Los productos lácteos plantean una dificultad distinta: al contener una notable proporción de calcio, la gelificación se produce al mínimo contacto del alimento con el alginato, de modo que se descontrola el proceso.

Pero el mayor obstáculo con el que ha topado la aplicación culinaria de la esferificación ha sido la brevedad del tiempo de vida útil. Una vez capturado en la membrana de las esferas, el calcio sigue penetrando, hasta que se produce la gelificación total de las mismas. Se forma entonces una piel gruesa, de textura desagradable, y se pierde la buscada sensación de "explosión" en la boca. Una esferificación del tamaño de un "ravioli" posee una vida útil de unos de 10 minutos a lo sumo; el "caviar", de 5 minutos.

En 2003 nos propusimos resolver el problema de la vida útil. Nuestro plan consistía en evitar la gelificación total por medio de la eliminación, mediante un agente secuestrante, del calcio sobrante. No lo conseguimos. Habíamos tomado el camino equivocado.

Por fin, en 2005, merced a una colaboración con Fernando Sapiña, de la Universidad de Valencia, hallamos la solución. Tras estudiar, mediante lupa binocular y microscopía electrónica, la evolución del calcio en las esferas, surgió la idea de invertir el proceso: si añadíamos primero el calcio y aplicábamos luego el baño de alginato, quizá lograríamos que el calcio migrara hacia el exterior de las esferas; el ion calcio migra fácilmente, no así el alginato (polisacárido), que es una molécula de gran tamaño. La hipótesis se ensayó con éxito en un zumo de melocotón. Había nacido la esferificación *inversa* (por contraposición a la esferificación *básica* inicial).

Tras refinar la técnica —evitar que la sal de calcio diera mal sabor a la preparación y aumentar la densidad de la mezcla líquida para facilitar su penetración en la dispersión viscosa de alginato—, ese mismo año logramos aceitunas verdes y *mozzarella* esferificadas de forma inversa. En 2006, la esferificación empezó a aplicarse también a las grasas. Se consolidaba así una nueva técnica culinaria al servicio de los cocineros más creativos.



Ravioli esférico de guisantes.

EL BULLI

Pere Castells es el responsable del departamento de investigación gastronómica y científica de la Fundación Alicia.

Dinámica de los casquetes glaciales



CONCEPTOS BASICOS

- Los casquetes de hielo continentales de Groenlandia y la Antártida retienen agua suficiente para elevar en más de 60 metros el nivel del mar.
- Una compleja "fontanería" de ríos, lagos y agua de fusión subyace bajo los casquetes glaciales. El agua "engrasa" el flujo de vastas corrientes de hielo hacia el océano.
- Durante milenios, la aportación de las precipitaciones de nieve ha compensado la pérdida de hielo. Hoy, el aire cálido y el agua de fusión superficial aumentan la lubricación y eliminan obstáculos naturales, lo que provoca el vertido al mar de enormes cantidades de hielo.
- Los modelos que describen el ascenso del nivel del mar provocado por el cambio climático ignoran los efectos que ejercen sobre la dinámica de los casquetes polares el agua subglacial y las corrientes de hielo.

Bajo los hielos de la Antártida y Groenlandia han aparecido flujos de agua líquida, que intensifican los efectos del cambio climático

Robin E. Bell

Nuestro laboratorio aéreo P-3 se aproximaba a la superficie helada del mar de Weddell. Pegada al suelo, boca abajo, intentaba ver, a través de la ventanilla del suelo del avión, las ballenas, los pingüinos y los icebergs que se acercaban y alejaban de mi vista. Desde una altura de 150 metros, todo se veía en miniatura, excepto las gigantescas barreras de hielo: extensiones de hielo que no parecen tener fin, tan gruesas como la longitud de varios campos de fútbol, que flotan en el océano Meridional, rodeando las capas de hielo que cubren la masa continental de la Antártida. A mediados del decenio de los ochenta, todos nuestros vuelos eran de reconocimiento. Cuando dejábamos nuestra base del sur de Chile, nos esperaban 12 horas en el aire. Aprovechábamos para hablar con los pilotos sobre el modo de llevar a cabo un aterrizaje forzoso en las barreras de hielo. No era hablar por hablar. En más de una ocasión habíamos perdido uno de nuestros cuatro equipos; además, desde 1987, se abría a lo largo del borde de la barrera Larsen B, en la península Antártica, una gigantesca grieta, que dificultaría un aterrizaje de emergencia.

La aparición de esa grieta hizo que nos preguntáramos si el mar que subyace bajo esas enormes masas de hielo se habría calentado tanto como para romperlas, a pesar de que se habían mantenido estables durante más de 10.000 años.

Unos diez años más tarde, Ted Scambos, del Centro Nacional de Datos de Hielo y Nieve en Boulder, observó un cambio en las imágenes de satélite meteorológico de las mismas barreras que yo había contemplado desde el P-3. Detectó la aparición de manchas oscuras, como pecas, sobre el blanco monótono del hielo. Imágenes posteriores en color mostraron que las manchas oscuras correspondían a áreas de color azul oscuro. El cambio climático global estaba calentando la península Antártica con mayor prontitud que ningún otro lugar de la Tierra; partes de la superficie de la barrera Lar-

1. UNA GIGANTESCA BARRERA DE HIELO flota en las aguas de la península Antártica y señala el final de una gran corriente de hielo. La corriente se origina con las nevadas del interior continental: se compactan en forma de hielo e inician lentamente su camino hacia los márgenes del continente, para terminar en el océano. Al promover la ruptura de las barreras de hielo, el cambio climático acelera el movimiento de las corrientes de hielo.

sen B se estaban convirtiendo en lagos azules de agua fundida.

Gordon de Q. Robin y Johannes Weertman, de la Universidad del Noroeste, habían advertido, varios decenios antes, que el agua superficial terminaría provocando grietas en una barrera de hielo. Scambos se percató de que el agua estancada podría hacer eso mismo: acortaría su camino a través de la barrera de hielo hasta las aguas del océano subyacente, causando la ruptura de toda la barrera. Hasta la fecha, no había ocurrido nada.

La sorpresa llegó a principios del verano antártico de 2001-2002. En noviembre de 2001, Scamos recibió un mensaje que aún recuerda claramente de Pedro Skvarca, del Instituto Antártico de Argentina, en Buenos Aires, que se proponía llevar a cabo un trabajo de campo en la Larsen B. Había agua por todas partes. Se estaban formando grietas profundas. A Skvarca le resultó imposible desplazarse y, por tanto, trabajar. A finales de febrero de 2002, empezaron a desaparecer los lagos, que se vaciaron (el agua siguió su camino a través de la barrera). A mediados de marzo, impresionantes imágenes de satélite mostraban la fragmentación de unos 3400 kilómetros cuadrados de la Larson B, un territorio casi tan grande como la isla de Mallorca. Nada quedó, excepto una flota de fragmentos de hielo de tamaños diversos: enormes como la isla de Manhattan y pequeños como un horno de microondas. Nuestra zona para aterrizajes de emergencia, que había permanecido estable durante milenios, había desaparecido. El 20 de marzo, las imágenes de satélite de Scambos del derrumbe de la barrera de hielo aparecieron destacadas en la primera plana del *New York Times*.

De repente, la posibilidad de que el calentamiento global alterara de forma súbita el mundo helado de los polos se convertía en una realidad. El siguiente agosto, la extensión de hielo marino al otro lado del planeta registró valores muy bajos y la fusión estival de la superficie del hielo de Groenlandia al-



2. AÑADA SOLO HIELO: no se requiere fusión. El nivel del agua en el vaso de la izquierda asciende cuando se añade hielo (*centro*). Cuando se funde el hielo, el nivel del agua no cambia (*derecha*). El nivel del mar asciende del mismo modo, cuando el hielo continental se desprende del casquete y entra en el mar.

SEBASTIAN COPELAND WWW.ANTARCTICABOOK.COM (*ice shelf*); BRIAN MARANAN PINEDA (*cubitos*)

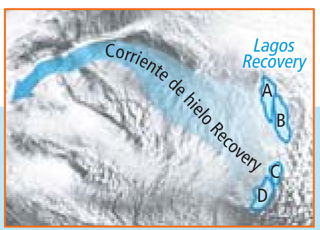
Los mayores casquetes de hielo del mundo

Groenlandia
Antártica

N
Océano Atlántico
Bahía de Baffin
GROENLANDIA
Estrecho de Davis
0 800 kilómetros

Tres casquetes de hielo retienen el 99 por ciento del hielo que provocaría el ascenso del nivel del mar si el calentamiento global causara su fusión o su desprendimiento hacia el océano (el otro 1 por ciento se concentra en los glaciares alpinos). Uno cubre la mayor parte de Groenlandia; los otro dos, separados por los montes Transantárticos, cubren la Antártida. El casquete de Groenlandia descansa casi totalmente sobre un lecho rocoso; fluye hacia el océano: la mitad en forma de agua de fusión y la mitad en forma de hielo glacial. En la Antártida, la mayor parte del hielo fluye hacia el océano desde regiones de hielo sólido de movimiento rápido (corrientes de hielo), que drenan el hielo desde regiones de movimiento más lento.





◂ Bajo el hielo antártico se ha descubierto una extensa red de lagos y ríos; el mapa de la Antártida (*arriba*) muestra la distribución de estas formaciones subglaciales. En la región de Recovery (*izquierda*), hay cuatro lagos subglaciales (*A*, *B*, *C* y *D*) que promueven el movimiento rápido de una corriente de hielo. La corriente de hielo de Recovery fluye a lo largo de unos 800 kilómetros hasta la barrera de hielo de Filchner.

➡ EN LA WEB

Nunca hasta ahora se había visto tan bien la Antártida como en un nuevo mapa digital que combina 1100 imágenes de satélite en un mosaico continuo de todo el continente. Visite http://lima.usgs.gov

canzó un máximo histórico. El agua de fusión de Groenlandia circulaba a raudales por las grietas; abría molinos glaciares (canales esculpidos por el agua que operan a modo de pozos sumideros), para hundirse luego hasta la base del casquete, llevándose consigo el calor estival. Allí, en vez de mezclarse con el agua de mar, como sucedía en la Larsen B, el agua debía mezclarse con lodo; formaba así una película que facilitaba el desplazamiento por el sustrato rocoso (lubricaba la superficie de contacto entre el hielo y la roca). El gigantesco casquete polar de Groenlandia aceleraba su movimiento, sobre los páramos rocosos, hacia el mar.

En fecha más reciente, en el marco del Año Polar Internacional (API), mis colaboradores y yo hemos esbozado un modelo del sistema de "fontanería" que fluye bajo el hielo de la Antártida. Aunque gran parte del agua que facilita el deslizamiento de los casquetes de hielo antárticos no proceda de la superficie, ejerce el mismo efecto lubricante. También en esta parte del globo, los casquetes de hielo experimentan una aceleración de los desplazamientos y el agrietamiento.

Si bien remotos, dichos procesos revisten suma importancia. Una tercera parte de la población mundial vive a unos 100 metros sobre el nivel del mar y la mayoría de las grandes ciudades se hallan cerca de la costa. Por cada 625 kilómetros cúbicos de hielo que se transfieren del continente al océano, el nivel del mar global asciende unos 1,6 milímetros. A primera vista, esa cifra parece inofensiva.

Sin embargo, veamos qué ocurre con el volumen de hielo atrapado actualmente en los tres grandes casquetes glaciales del planeta. Si el hielo de la Antártida Occidental se fundiera, el nivel del mar ascendería 5,8 metros; el hielo del casquete de Groenlandia añadiría otros 7,3 metros; y el hielo del casquete de la Antártida Oriental elevaría hasta 51,8 metros más el nivel de los océanos. En total: 64,9 metros (el alminar de la Giralda de Sevilla mide unos 50 metros de altura).

El agua líquida desempeña una función crucial —hasta ahora infravalorada— en los movimientos internos y el flujo hacia el mar de los casquetes de hielo. Un conocimiento más hondo de los procesos de formación del agua líquida y del modo en que el clima intensifica los efectos de la misma sobre el hielo polar, importa en grado notable para la predicción de las consecuencias del calentamiento global sobre el nivel del mar.

Rugidos en el hielo

Que los casquetes de hielo cambian ya se sabía. Pero se suponía que las transformaciones operadas eran graduales, de la clase que se infieren de las dataciones con carbono 14; vale decir, no tan céleres como la ruptura de la barrera Larsen B, que se puede señalar en un calendario.

Según el modelo clásico, un casquete de hielo acumula nieve (originada por la evaporación del agua de mar) en su centro y vierte al mar que lo baña una masa casi igual, mediante la fusión o la separación de icebergs. En la Antártida, alrededor del 90 por ciento del hielo que alcanza el mar es transportado por corrientes de hielo, enormes cintas transporta-

MAPPING SPECIALISTS

doras de hielo de igual grosor que el casquete circundante (entre uno y dos kilómetros) y unos 100 kilómetros de anchura, que se adentran en el mar hasta más de 800 kilómetros a contracorriente. En su avance por el casquete, las corrientes de hielo abren brechas laterales; cerca del litoral, se desplazan entre unos 200 y 1000 metros al año. El hielo que ciñe al casquete permanece inmóvil.

Pero nos equivocaríamos si pensáramos que ese equilibrio persiste a largo plazo. En realidad, los casquetes de hielo no están fijos. Estudios realizados a partir de testigos de hielo sugieren que el casquete de Groenlandia era menor en un pasado lejano de lo que es hoy, sobre todo durante el periodo interglaciar más reciente, hace 120.000 años, cuando las temperaturas globales eran cálidas. En 2007, Eske Willerslev, de la Universidad de Copenhague, lideró un proyecto internacional para el estudio de ecosistemas antiguos, a partir del ADN procedente de la base del casquete de hielo. Los hallazgos revelaron que, hace 400.000 años, Groenlandia se hallaba cubierta de coníferas y habitada por escarabajos, mariposas y otros invertebrados. En resumen: cuando las temperaturas globales habían aumentado, el casquete de hielo de Groenlandia había remitido.

En la actualidad, la precipitación de nieve sobre el casquete de Groenlandia está aumentando, probablemente a causa de las alteraciones de las pautas climáticas. Aun así, la pérdida de masa en sus márgenes es lo suficientemente elevada como para inclinar la balanza a favor de una pérdida neta. Disminuye la altura de los bordes del casquete de hielo. Y las mediciones por satélite de las pequeñas variaciones de la gravedad confirman que los márgenes del casquete están perdiendo masa.

De las mediciones de velocidad se desprende que los mayores glaciares de desembocadura (corrientes de hielo canalizadas en las montañas) aceleran su camino hacia el mar, sobre todo en el sur. Los rugidos de seísmos glaciales son cada vez más frecuentes a lo largo de los glaciares de desembocadura de los casquetes de hielo.

Lo mismo ocurre en la Antártida Occidental, donde el casquete de hielo está también perdiendo masa. Ya desapareció en un pasado reciente (a escala geológica). Nada impide que vuelva a hacerlo. Reed P. Scherer, de la Universidad de Illinois Norte, descubrió, en un sondeo del casquete de hielo de la Antártida Occidental, microfósiles que se crean sólo en mar abierto. La edad de los fósiles reveló que ciertas formas de vida propias del mar abierto podrían haber vivido allí hace 400.000 años. Su presencia implica que el casquete de la Antártida Occidental debió de desaparecer por entonces.

Tan sólo el casquete de la Antártida Oriental ha persistido a lo largo de las fluctuaciones térmicas de los últimos 30 millones de años. Ello lo convierte, de lejos, en el más antiguo y estable de los casquetes glaciales. Además, es el mayor de todos. En muchas partes, el grosor del hielo supera los 3,2 kilómetros; en volumen, decuplica el casquete de Groenlandia. Se formó cuando la Antártida se separaba de Sudamérica, hace unos 35 millones de años y cuando bajaron los niveles de dióxido de carbono atmosférico. Parece que el casquete glacial de la Antártida Oriental está creciendo en su interior, pero se han detectado algunas pérdidas de masa en los márgenes.

Pérdidas aceleradas

¿Cuáles son los procesos que determinan las pérdidas netas de masa de los casquetes glaciales de Groenlandia y la Antártida Occidental? Las pérdidas en los dos casquetes se atribuyen al incremento de velocidad de las corrientes de hielo y los glaciares de desembocadura que vierten su masa al océano. El volumen extra de agua desplazada por la masa de hielo extra es, por tanto, la causa del ascenso global del nivel del mar. (La ruptura o fusión de las barreras de hielo en flotación no tienen ningún efecto neto sobre el nivel del mar. El hielo en flotación desplaza un volumen de agua igual a su propio peso; cuando se funde, su peso no cambia, pero su nuevo y menor volumen encaja perfectamente en el mismo volumen que desplazó cuando era hielo.)

Inundación desde los casquetes de hielo

Si los casquetes de hielo actuales desaparecieran, el ascenso resultante del nivel del mar transformaría las costas de todo el planeta. Se muestran abajo los efectos en la costa de Florida. De hecho, si el cambio climático causara la desaparición de uno de los casquetes, desaparecerían también partes de los otros, y los efectos sobre el nivel del mar serían aún mayores de lo que se representa aquí.



▲ **El casquete glacial de la Antártida Occidental** retiene hielo suficiente para elevar **5,8 metros** el nivel del mar. Se inundarían la costa y el sur de Florida.



▲ **El casquete glacial de Groenlandia** equivale a **7,3 metros** de ascenso del nivel del mar. La inundación sería similar a la que provocaría la Antártida Occidental.



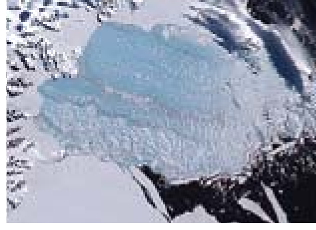
▲ **El casquete glacial de la Antártida Oriental** elevaría el nivel del mar unos **51,8 metros.** El estado de Florida quedaría totalmente inundado.

LA RUPTURA DE LARSEN B

Las imágenes de satélite recogen la brusca fractura de un segmento (del tamaño de Mallorca) de una barrera de hielo en las aguas de la península Antártica. Se trata de la barrera Larsen B. Las pequeñas regiones oscuras en la superficie glacial de la imagen superior corresponden a agua de fusión generada en condiciones anómalas de aire cálido; en la región azul claro de la imagen inferior se observan los fragmentos del segmento de la barrera de hielo original.



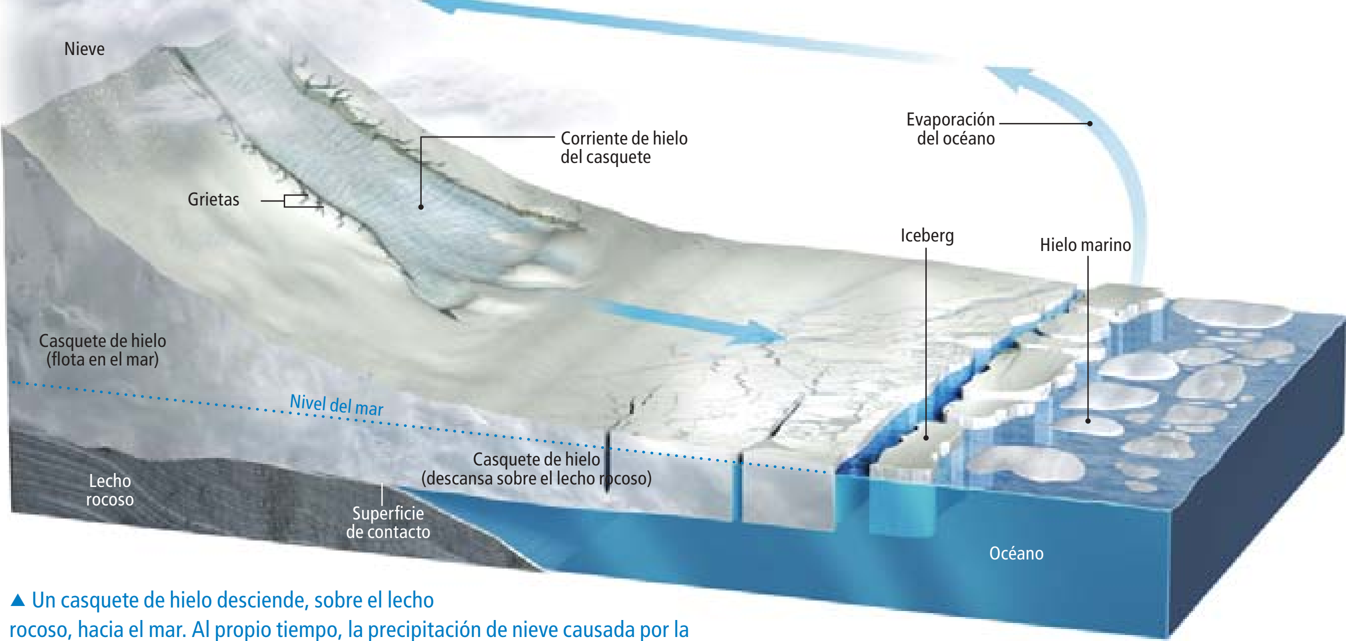
31 de enero de 2002



7 de marzo de 2002

MAPPING SPECIALISTS (*mapas de Florida*); NASA/ESTUDIO DE VISUALIZACION CIENTIFICA DEL CENTRO DE VUELOS ESPACIALES GODDARD (*Larsen B*)

Equilibrio dinámico



▲ Un casquete de hielo desciende, sobre el lecho rocoso, hacia el mar. Al propio tiempo, la precipitación de nieve causada por la evaporación del agua de mar rellena parte o toda la masa de hielo. La mayor parte del hielo que fluye desde el interior continental es transportado al mar por corrientes de hielo, cintas transportadoras del hielo que se desprende del casquete circundante; el casquete de hielo se desplaza también hacia el mar, aunque más despacio. Una vez la base del hielo en movimiento abandona el continente, el hielo flotante se convierte en barrera de hielo; desplaza una masa de agua igual a su peso, elevando en proporción el nivel del mar. Durante los últimos milenios, esos procesos no han causado un aumento neto del nivel del mar ni el retroceso de los casquetes porque la evaporación del agua de mar y las nevadas sobre el continente han compensado el vertido de hielo al océano.

KEVIN HAND

En los últimos cinco años, se han propuesto dos factores que explicarían la aceleración de los flujos. En primer lugar, una corriente de hielo, que aumenta su velocidad de forma repentina si encuentra a su paso, en la base, lodo, agua de fusión o incluso lagos profundos que suavicen su camino de forma intermitente. En segundo lugar, las barreras de hielo marinas (que flotan en el océano Meridional en torno a la Antártida) o las lenguas de hielo (largas aunque estrechas barreras de hielo ligadas a un solo glaciar de desembocadura, muy comunes en los fiordos de Groenlandia); si se rompieran, sus masas enormes no sostendrían por mucho tiempo el flujo de las corrientes de hielo. Los glaciares que alimentan la barrera Larsen B, por ejemplo, aumentaron su velocidad de forma drástica cuando la barrera se desintegró en 2002. Así, "con el tapón levantado", las corrientes de hielo y los glaciares continentales retenidos hasta entonces acelerarían su migración hacia el océano, terminando por engrosar el volumen total del mar.

Hace tiempo que se conoce un tercer factor, que guarda estrecha relación con el segundo: del mismo modo que los glaciares se aceleraron debido a la desintegración de la barrera Larsen B, un casquete de hielo se desplaza con mayor velocidad si las corrientes cálidas oceánicas adelgazan alguna barrera hacia la que circula el casquete de hielo. En el sector del mar de Amundsen, en la Antártida Occidental, la superficie del casquete de hielo se ha reducido hasta 1,5 metros al año y ha aumentado su velocidad un 10 por ciento. Todo ello por efecto del adelgazamiento de la barrera de hielo.

Efecto lubricante

La fractura de la barrera de hielo Larsen B y la no menos preocupante relación entre el drenaje repentino del agua superficial en Groenlandia y la aceleración del flujo de los casquetes de hielo han motivado que nos centráramos en la función desempeñada por el agua líquida en la dinámica de los casquetes glaciales. Hemos descubierto que el agua líquida ha contribuido a que el movimiento del hielo hacia el mar se produjera al mismo ritmo que las precipitaciones de nieve del interior. Con ello se ha manteniendo el equilibrio dinámico de los casquetes, en algunos casos durante millones de años.

En las corrientes de hielo de la Antártida Occidental, el agua lubricante se funde fuera del casquete, en la base del mismo, a causa del calor que produce la fricción entre el hielo en movimiento y la roca del sustrato. En la Antártida Oriental, el calor que funde el agua subglacial proviene, sobre todo, de la corteza

La autora

Robin E. Bell dirige el programa ADVANCE en el Instituto de la Tierra de la Universidad de Columbia. Ocupa también la cátedra Doherty Senior en el Observatorio de la Tierra Lamont-Doherty de Columbia, donde dirige un extenso programa de investigación sobre la Antártida. Estudia los mecanismos de derrumbe del casquete glacial, así como los fríos ambientes subglaciales antárticos.

continental subyacente. El hielo en la Antártida Oriental es tan grueso, que constituye una suerte de capa aislante; capta el calor geotérmico. El agua subglacial introduce una enorme inestabilidad en los movimientos del hielo. Fenómenos como la fractura de la Larsen B superan cualquier predicción de los glaciólogos sobre la aceleración del flujo del hielo.

La idea de que la base de los casquetes de hielo podía fundirse surgió en 1955, cuando Gordon Robin sugirió que el calor geotérmico alcanzaría parte del agua subglacial, habida cuenta de que el grueso casquete de hielo suprayacente aislaba de la fría superficie su base. Sin embargo, hasta los años setenta no se confirmó la hipótesis. Sucedió, además, de forma alarmante. Por aquel entonces, se había desarrollado un radar que penetraba en el hielo; el dispositivo permitía "ver", a través del casquete, la superficie subyacente. Robin organizó un equipo norteamericano, británico y danés para recopilar datos del radar mediante vuelos por todo el continente antártico. La mayor parte del tiempo, las señales de retorno del radar que recibía el osciloscopio de a bordo eran irregulares, tal y como se esperaría de señales que rebotaran en cimas y valles cubiertos de hielo grueso. En algunos lugares, en cambio, el osciloscopio trazaba una línea recta. La energía del radar se reflejaba en una superficie especular. A partir de sus conocimientos sobre navegación (había sido marinero), Robin llegó a la conclusión de que la superficie en cuestión debía corresponder a agua subyacente al casquete de hielo. El radar mostró que algunos de esos espejos subglaciales se extendían hasta unos 30 kilómetros.

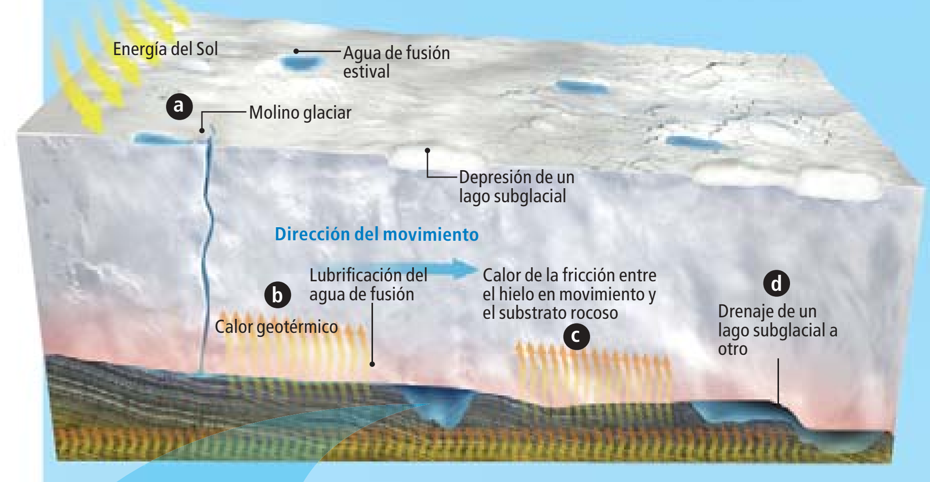
Robin tuvo que esperar 20 años casi hasta que se desarrollara una nueva técnica que arrojara nueva luz sobre la estructura de los casquetes de hielo. En el decenio de los noventa, la Agencia Espacial Europea terminó su primera cartografía completa de la superficie helada. Al observar la imagen, sorprende de inmediato una región plana en el centro del casquete. A unos tres kilómetros sobre el agua, la estación Vostok, la base antártica rusa, se encuentra sobre una superficie de hielo que perfila el lago. El tamaño del lago Vostok resulta ahora evidente: es tan grande como el lago Ontario.

Fontanería subglacial

El descubrimiento de lagos subglaciales ha cambiado nuestra concepción del agua subglacial. No es escasa, sino abundante. Ocupa amplias extensiones. Se han localizado en la Antártida más de 160 lagos subgla-

Ni tan estable, ni tan helado

Se han descubierto redes de agua líquida en el interior y bajo los casquetes de hielo. Podrían provocar una inestabilidad en el hielo superior a la que se pensaba hasta ahora, dejándolo más expuesto a los efectos del calentamiento global.

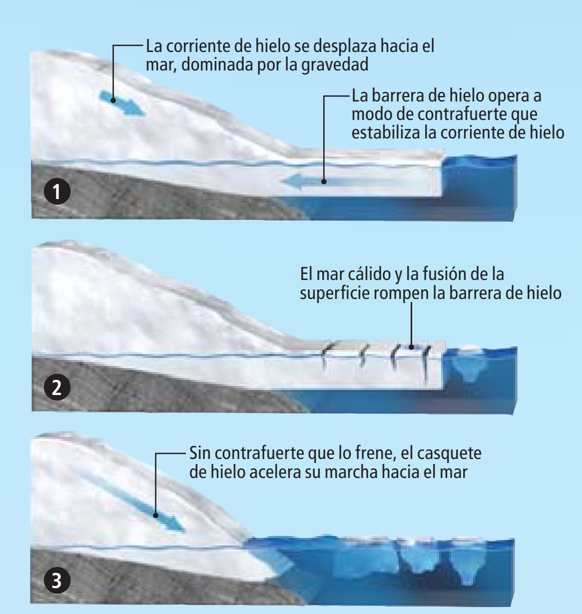


▲ Pendiente resbaladiza

El agua subglacial —sea cual sea su origen— lubrica la superficie de contacto entre el lecho rocoso y la base de un casquete de hielo. En Groenlandia **a**, el calentamiento del clima ártico lleva el agua de fusión superficial a circular por los molinos glaciares (grietas tubulares y angostas que operan a modo de sumideros), portando consigo la energía solar hasta la base del casquete de hielo. El drenaje se ha relacionado estrechamente con la aceleración del flujo de hielo hacia el mar. En la Antártida, el drenaje del agua de fusión contribuye poco al movimiento del casquete. Pero el agua se acumula en la base de los casquetes glaciales por otros medios. El hielo de la base del casquete se funde a causa del calor geotérmico **b** o de fricción **c**, que se encuentra atrapado por el efecto aislante del mismo casquete. El agua se halla también en una extensa red de ríos y lagos que desembocan unos en otros **d**. En la Antártida, el agua de la base de los casquetes permanece aislada, casi en su totalidad, de los efectos directos e inmediatos del calentamiento global; sin embargo, su acción lubricante aumenta la vulnerabilidad de los casquetes frente a cualquier alteración que elimine obstáculos que, como las barreras de hielo, frenan el flujo.

▸ Sin punto de apoyo

Las corrientes de hielo deslizantes, sobre todo en la Antártida Occidental, descenderían rápidamente hasta el mar por la fuerza de la gravedad, si no fuera por el efecto "contrafuerte" de las barreras de hielo flotantes que rodean el continente **1**. El aire y el agua de mar cálidos de los últimos años, sin embargo, han causado el adelgazamiento de las barreras de hielo; en el caso de la de Larsen B, su ruptura **2**. En ausencia de punto de apoyo, nada impediría que una corriente de hielo se estrellase contra el mar y provocase un rápido ascenso del nivel del mar **3**.



KEVIN HAND



AÑO POLAR INTERNACIONAL

Cuando la barrera de hielo Larsen B se hundió en marzo de 2002, los científicos polares se dieron cuenta que debían estimar en meses y años —no en decenios— su calendario de actuación sobre el calentamiento global. El trabajo empezó con la organización del cuarto Año Polar Internacional (API), que tendrá lugar hasta marzo de 2009. Más de 50.000 expertos procedentes de más de 60 países se han unido al esfuerzo para el estudio de los ambientes polares.

1872-1874 Expedición austro-húngara al polo Norte, comandada por Karl Weyprecht

1882-1883 El sueño de Weyprecht, un proyecto de cooperación internacional en el estudio polar, se hace realidad con el primer Año Polar Internacional (API)

1911 La expedición de Roald Amundsen es la primera en alcanzar el polo Sur

1912 La expedición de Robert Falcon Scott alcanza el polo Sur semanas después de la de Amundsen; el grupo de Scott perece durante el viaje de vuelta

1914-1916 La expedición transantártica de Ernest Shackleton queda atrapada en el hielo; logran rescatarlos

1932-1933 Segundo API

1957-1958 Año Geofísico Internacional (tercer API)

2002 Hundimiento de la barrera Larsen B

2007-2009 Cuarto API

ciales. En conjunto, su volumen supone el 30 por ciento del agua de todos los lagos continentales. Mis estudios del lago Vostok en la Antártida Oriental en 2001 revelaron un sistema estable. En los últimos 50.000 años, el agua del lago se ha intercambiado, lentamente, con el hielo suprayacente, fundiéndose y congelándose.

En un pasado remoto, en cambio, la situación no debió de ser tan estable. El registro geológico nos revela que los lagos subglaciales pueden vaciarse de forma súbita, de una sola vez, liberando cantidades enormes de agua bajo el casquete de hielo o vertiéndola directamente al océano. Grandes valles de más de 240 metros de profundidad (lo suficiente para engullir entera la madrileña torre de comunicaciones de Torrespaña) rodean todo el continente antártico: son las cicatrices dejadas por corrientes subglaciales gigantescas.

El Vostok y los otros lagos subglaciales se consideraban museos naturales, aislados del resto del mundo desde hace millones de años. Pero en 1997, se halló en la Antártida Occidental un primer indicio de que tales avenidas subglaciales siguen vivas. La superficie del casquete de hielo se hundió más de 50 centímetros en tres semanas. Había sólo una explicación posible: el agua del lago subglacial se había drenado, arrastrando el hundimiento del hielo suprayacente.

Ese mismo año, un equipo liderado por Duncan J. Wingham, del Colegio Universitario de Londres, midió la elevación de la mayor parte del hielo de la Antártida Occidental. En un sector, el hielo se hundió 3 metros en 16 meses; 290 kilómetros ladera abajo, dos sectores ascendieron unos 90 centímetros. Una vez más, la explicación resultaba obvia: un río subglacial había drenado agua de un lago y llenado dos lagos curso abajo.

Hace poco más de un año, Helen A. Fricker, del Instituto Scripps de Oceanografía en la Jolla, investigaba las elevaciones de la superficie, a partir de los datos del satélite ICESat. Cierto día, observó en uno de los perfiles del casquete de hielo una clara divergencia. Se derrumbó una región a lo largo del margen de una de las corrientes de hielo más largas de la Antártida Occidental: cayó 9 metros en 24 meses. Fricker examinó la superficie del hielo que rodeaba el nuevo lago, el lago Engelhardt, y se percató de que no era único, sino que formaba parte de una serie de lagos subglaciales en cascada. La gran cantidad de agua que circulaba a través del sistema de drenaje bajo las principales corrientes de hielo, resultó ser otro agente promotor de cambios en el flujo de una corriente de hielo.

Lagos subglaciales

La sospecha de que los lagos subglaciales desestabilizaban el casquete de hielo me indujo a pensar de que los nuevos medios de reconocimiento por satélite permitirían revelar su ubicación. Además, los modelos del casquete predecían la existencia de otra serie de grandes lagos por descubrir. Me intrigaba la posibilidad de encontrarlos. Con las nuevas técnicas de reconocimiento por satélite y los datos del láser del ICESat, descubrimos cuatro lagos subglaciales, tres de ellos mayores que todos los demás, si exceptuamos el Vostok.

Comparados con los ríos subglaciales y los lagos de drenaje, los cuatro nuevos lagos resultaban poco atractivos. El interés de nuestro estudio se centraba en la dinámica del hielo polar y la capacidad de los casquetes glaciales para elevar el nivel del mar. No parecía que esos lagos guardaran relación con ninguno de esos fenómenos. Con todo, proseguí la investigación. Dichos lagos se hallaban lejos del centro del casquete glacial (donde habíamos encontrado los lagos de mayor tamaño). En los márgenes de uno de ellos se abrieron brechas y grietas; las imágenes de satélite mostraban los campos de grietas.

Las grietas aparecen cuando una corriente de hielo avanza rápida por un casquete. En las imágenes, observé líneas de flujo sobre el casquete, que conectaban la región de las grietas con una corriente de hielo denominada Recovery. La interferometría de satélite mostraba que la corriente Recovery empezaba a acelerarse en los lagos. Antes de cruzar los lagos, el casquete glacial avanzaba a una velocidad inferior a los 3 metros anuales; al otro lado de los lagos, aceleraba hasta alcanzar una velocidad de entre 20 y 30 metros anuales. Concluimos, pues, que los lagos subglaciales activaban el flujo de una corriente de hielo. Por primera vez se establecía una relación directa entre la presencia de lagos subglaciales y la aceleración del flujo de la superficie.

Carecemos todavía de explicación para esa relación. Quizá los lagos se salen lentamente de su cuenca, aportando agua para lubricar la base del casquete glacial. Podría ser también que el agua del lago calentara la base del casquete de hielo conforme ésta cruzara sobre él, facilitando la aceleración del casquete una vez cruzado el lago.

Año Polar Internacional

La comprensión de la función del agua de los casquetes de hielo y de los lagos subglaciales ha dado un salto cualitativo en los dos últimos años, aunque queda todavía mucho por averiguar. Uno de los objetivos principales del Año Polar Internacional es determinar el





3. LA ABUNDANCIA DE AGUA SUPERFICIAL fundida por el aire cálido sobre el casquete glacial de Groenlandia queda espectacularmente representada en estas dos fotografías. En verano, la superficie del hielo aparece salpicada de lagos, de varias kilómetros de extensión, y desgarrada por grietas (*izquierda*). Un torrente de agua de fusión corre por un molino glaciar (canal esculpido por el agua que opera a modo de pozo sumidero); penetra hasta la base del casquete, donde provoca la aceleración del flujo de hielo (*derecha*). Las plataformas flotantes de hielo de la Antártida acumulan también agua de fusión superficial.

JAMES BALOG *aurora Photos*

estado de los casquetes polares y predecir su evolución. El reciente informe del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC) subraya que el mayor interrogante para la predicción de los efectos del calentamiento global es la incertidumbre respecto al futuro de los casquetes polares. Ninguno de los modelos climáticos aplicados hasta la fecha tiene en cuenta las principales corrientes de hielo; tampoco incorporan una representación precisa de la base de un casquete glacial.

En breve, los modelos climáticos actuales infravaloran la contribución de los casquetes polares en el ascenso del nivel del mar. Cierto es que la actualización de los modelos mediante la cuantificación de los movimientos del hielo requiere un impulso sostenido a la investigación. Pero si no conocemos lo que sucede en la base de los casquetes de hielo, no podremos predecir su comportamiento global en el futuro. Debemos averiguar dónde se encuentra el agua subglacial, cuál es la causa de su movimiento y de qué modo repercute en la dinámica de los casquetes glaciales.

El API ofrece una oportunidad excelente para hallar respuestas. Mediante la movilización de equipos científicos internacionales, se podrá utilizar una nueva generación de radares aéreos para cartografiar el agua subglacial. La nueva instrumentación gravimétrica (desarrollada en su origen para la industria minera) se adaptará para estimar el volumen de agua de los lagos subglaciales. A través de las medidas de la elevación de la superficie de hielo se realizará el seguimiento de los flujos de agua. Modernos sismógrafos registraran los terremotos glaciales.

En Groenlandia, se instalarán instrumentos de medida del movimiento del casquete de hielo en los principales glaciares de desembocadura. El Centro para la Detección Remota de Placas de Hielo en Lawrence empleará un avión autónomo para cartografiar el agua en la base del casquete de hielo. En la Antártida Oriental, mi equipo recorrerá, con un Twin Otter (avión bimotor y propulsado con hélices), los lagos de Recovery y las inexploradas montañas Gamburtsev para estudiar la formación de los lagos y la generación de corrientes de hielo. Al mismo tiempo, un equipo estadounidense y danés, del que forma parte Ted Scambos, cruzará los lagos de Recovery, midiendo la velocidad del casquete de hielo y su gradiente de temperatura en su parte más elevada. Un equipo ruso recogerá muestras del lago Vostok, otro italiano estudiará el lago Concordia, cerca de la estación franco-italiana de la Antártida Oriental, y un tercer grupo británico se ocupará de un lago en las montañas Ellsworth, en la Antártida Occidental.

Ese haz de proyectos refleja el consenso y la premura de la comunidad científica internacional: la comprensión de los cambiantes casquetes de hielo y del agua que gobierna su dinámica resulta crucial para el futuro de nuestra sociedad.

Bibliografía complementaria

GLACIOLOGY: LUBRICATING LAKES. Jack Kohler en *Nature*, vol. 445, págs. 830-831; 22 de febrero, 2007.

LARGE SUBGLACIAL LAKES IN EAST ANTARTICA AT THE ONSET OF FAST-FLOWING ICE STREAMS. Robin E. Bell, Michael Studinger, Christopher A. Shuman, Mark A Fahnestock y Ian Joughin en *Nature*, vol. 445, págs. 904-907; 22 de febrero, 2007.

AND ACTIVE SUBGLACIAL WATER SYSTEM IN WEST ANTARTICA MAPPED FROM SPACE. Helen Amanda Fricker, Ted Scambos, Robert Bindschadler y Laurie Padman en *Science*, vol. 315, págs. 1544-1548; 16 de marzo, 2007.

ICE SHEETS. Charles R Bentley, Robert H. Thomas e Isabella Velicogna. Section &A en *Global Outlook for Ice and Snow*, págs. 99-114; United Nations Environment Programme, 2007.

La tabla periódica

Símbolo de referencia en el campo de la química, la tabla ha estado siempre sometida a examen y debate

Eric R. Scerri

CONCEPTOS BASICOS

- La tabla periódica constituye uno de los iconos más poderosos de la ciencia. Facilita la comprensión del modo en que los elementos químicos reaccionan entre sí y explica las propiedades que subyacen bajo esa reactividad.
- Dos ideas fundamentales contribuyeron a la evolución del sistema periódico: las tríadas de elementos y la hipótesis de Prout. Mendeléiev publicó en 1869 su primera propuesta.
- El concepto de elemento y la distribución de la tabla se han ido refinando conforme se ahondaba en la estructura atómica de la materia. Se debaten todavía las virtudes de las distintas formas de representar el sistema periódico.

Adorna las paredes de salas de conferencias y laboratorios en las universidades y en la industria. Constituye uno de los iconos más poderosos de la ciencia. Capta la esencia de la química con un diseño elegante. La tabla periódica facilita la comprensión del modo en que los elementos reaccionan entre sí y establecen enlaces químicos. Explica las propiedades que subyacen bajo esa reactividad.

El sistema periódico es tan fundamental, omnipresente y consabido en el estudio de la química, que, a menudo, se da por sentado. Un siglo después de la muerte del descubridor del sistema periódico, el químico ruso Dimitri Mendeléiev, ha llegado el momento de revisar los orígenes y la posición que ocupa en la actualidad esta clasificación química, convertida ahora en estándar. Hubo varios precursores del sistema periódico de Mendeléiev. Persisten los debates sobre cuál es la mejor manera de representar el sistema periódico y si existe un "modo óptimo" de hacerlo.

El sistema periódico de elementos se denomina así porque expresa gráficamente el modo en que se repiten, en intervalos regulares, ciertas propiedades de las sustancias químicas. En la tabla moderna de 117 elementos, cada uno se coloca en filas en orden creciente de número atómico (el número de protones del núcleo). Hay siete filas; cada una constituye un período. La longitud varía de un período a otro: el primero comprende dos elementos; los dos siguientes, ocho elementos cada uno; los dos pares de períodos restantes constan de 18 y 32 elementos, respectivamente.

Las columnas constituyen grupos (hay en total 18); abarcan elementos con un comportamiento químico semejante, lo que guarda relación con el número de electrones de la capa externa de los átomos, o capa de valencia. Así, a todos los elementos del grupo 17, los halógenos, les falta un electrón para completar su capa de valencia, por eso todos tienden a adquirir electrones durante las reacciones químicas y forman ácidos con el hidrógeno.

Los clásicos

Muchos han sido los cambios que ha sufrido la tabla periódica desde que Mendeléiev publicó en 1869 su primera propuesta, que mostraba 8 grupos, 12 filas y 66 elementos. Pero la tabla de Mendeléiev no surgió de la nada. Dos ideas fundamentales contribuyeron a la evolución del sistema periódico: las tríadas de elementos y la hipótesis de Prout; según ésta, el peso atómico de los elementos debía ser múltiplo entero del peso atómico del hidrógeno, el más ligero de todos.

En 1817, Johann Döbereiner advirtió que varios grupos de tres elementos constituían tríadas con dos características de interés: el elemento situado en medio de la tríada no sólo presentaba una reactividad química intermedia entre los otros dos, sino que también tenía un peso atómico intermedio. A diferencia del número atómico, un valor todavía no establecido entonces, el peso atómico se conocía desde comienzos del siglo XIX. La idea consistía en determinar el peso de cada unidad indivisible de materia en relación al hidrógeno, cuyo peso se tomó como unidad. Dado que se ignoraba la fórmula de numerosos compuestos, el cálculo de pesos atómicos se resintió de cierta imprecisión durante un tiempo. Con todo, Döbereiner encontró, en algunas tríadas, que el elemento intermedio (por ejemplo, el selenio en la tríada formada por "azufre, selenio y telurio") poseía un peso atómico próximo a la media del peso de los otros dos elementos. En esos años, el peso atómico del azufre era 32,239, mientras que el del telurio era



1. LA TABLA PERIODICA constituye la referencia más socorrida en el campo de la química. En un formato compacto, encierra una extensa información sobre los elementos. Theodore Gray diseñó este módulo expositivo con el fin de mejorar el atractivo de la tabla mediante la adición de muestras de los elementos. (A la izquierda, la tríada formada por azufre, selenio y telurio, cuyo estudio fue un precursor del sistema periódico.) La historia de la tabla periódica se ha escrito a través de mejoras graduales, desde las primeras mediciones del peso atómico hasta las representaciones alternativas actuales, que apenas si guardan semejanza con un mapa bidimensional.

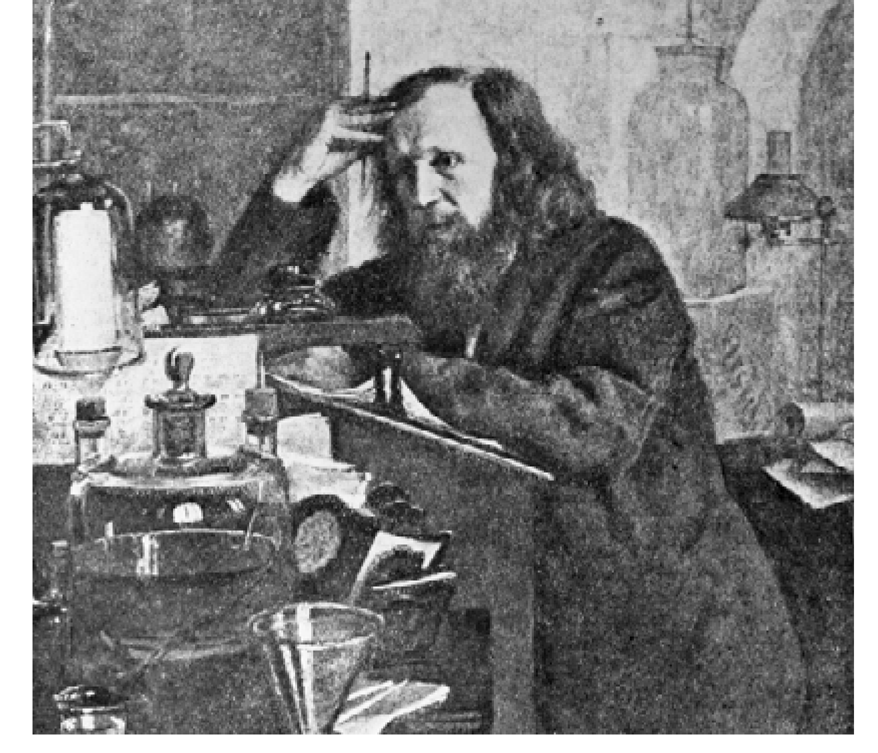
129,243. El promedio de ambos es 80,741, lo que se acerca al valor experimental obtenido para el selenio, 79,264.

La importancia de ese descubrimiento residía en la relación de propiedades químicas cualitativas, la reactividad por ejemplo, con datos numéricos de los elementos. Sugería la existencia de algún orden numérico subyacente, que podría servir para relacionar los elementos de forma sistemática.

Döbereiner descubrió también otras tríadas: “calcio, estroncio y bario” y “litio, sodio y potasio”. Otros químicos hallaron nuevas tríadas. Y empezaron a diseñar tablas que relacionaran las tríadas entre sí. Sin embargo, algunas de esas tablas degeneraron en simple numerología, sobre todo las que olvidaron las relaciones químicas entre los elementos. En su artículo de 1857, Ernst Lenssen propuso la existencia de la tríada “silicio, boro y flúor”, a pesar de la ausencia de conexiones químicas entre estos elementos. Con todo, el aliciente de la búsqueda de tríadas animó a los químicos a determinar los pesos atómicos con mayor exactitud, una tarea sin duda beneficiosa para la química.

Un poco antes, en 1815, William Prout propuso otro principio general. En un grupo reducido de artículos, que publicó de forma anónima, Prout afirmó que el hecho de que el peso atómico de numerosos elementos fuera múltiplo entero del peso del hidrógeno indicaba que los elementos se componían de múltiples hidrógenos. En su opinión, ello implicaba la unidad esencial de la materia. Sin embargo, algunos elementos como el nitrógeno, cuyo peso atómico era 12,6 veces el del hidrógeno, parecían apuntar en otra dirección. Los defensores de la hipótesis de Prout consideraban esos hechos meras anomalías, que desaparecerían cuando se lograra una determinación más exacta de los pesos atómicos.

Al igual que en el caso de las tríadas, los intentos de confirmar o refutar la hipótesis de Prout contribuyeron a renovar los esfuerzos en pro de la determinación de los pesos atómicos. Sin embargo, aunque ambas ideas resultaron fructíferas, no tardaron en aflorar sus deficiencias en cuanto aumentó la precisión de las medidas de los pesos atómicos. La noción de tríada, harto indefinida, se limitaba a grupos cuidadosamente seleccionados de tres elementos. Respecto a la hipótesis de Prout, aparecieron numerosas excepciones en forma de múltiplos no enteros del peso atómico del hidrógeno. Empleando el lenguaje de Karl



2. DIMITRI IVANOVICH MENDELEIEV nació en 1834 en Tobolsk, Siberia. Fue el menor de catorce hermanos. Estudió en San Petersburgo, de cuya universidad llegó a ser profesor de química en 1863. Publicó su tabla periódica en 1869. Aunque no fue la primera, su versión es la que tuvo mayor impacto en la comunidad científica. Abogó por el sistema periódico, defendió su validez y dedicó tiempo a su elaboración. Mendeléiev murió en 1907. Una estatua del químico con su tabla se alza hoy en San Petersburgo.



Popper, ambas ideas fueron "refutadas" en la segunda mitad del siglo XIX.

A principios del siglo XX, se descubrió que el número atómico ofrecía un criterio más eficaz que el peso atómico para la ordenación de los elementos en una secuencia lineal. Henry Moseley descubrió que se podía usar la difracción de rayos X para relacionar el número atómico con la carga eléctrica positiva, es decir, el número de protones del núcleo atómico. Cuando se revisan el concepto de tríada y la hipótesis Prout a la luz del número atómico, parece que ambas ideas realizaron lo que otro filósofo, Imre Lakatos, ha denominado una "regresión de la teoría". Desde el punto de vista del número atómico, los elementos presentan valores que son múltiplos exactos del número de protones del átomo de hidrógeno; puesto que el hidrógeno posee sólo un protón, todos los valores son múltiplos suyos. En un sentido quizá más profundo, la astrofísica moderna ha demostrado que casi todos los elementos se formaron a partir de átomos de hidrógeno y helio, que se combinaron durante la gran explosión ("Big Bang"), al comienzo del universo, del mismo modo que ocurre hoy en el interior de las estrellas y supernovas.

Si se considera el número atómico en lugar del peso atómico para las tríadas descubiertas en el siglo XIX, se comprueba que el número atómico del elemento central corresponde *exactamente* a la media del número atómico de los otros dos elementos. De hecho, alrededor de la mitad de todas las posibles tríadas de la tabla periódica moderna son exactas desde ese punto de vista. Sin embargo, muchas otras tríadas no son correctas, ni siquiera de modo aproximado, porque el número atómico del elemento central está muy lejos de ser el promedio de los otros dos.

La causa de ese comportamiento reside en la tabla periódica, que presenta una repetición en la longitud de todos los períodos (con la excepción del primero, muy breve, que consta sólo de los elementos hidrógeno y helio). El segundo período comprende ocho elementos (del litio al neón); el tercero, otros ocho (del sodio al argón); le siguen dos períodos de 18 elementos, luego dos períodos de 32 elementos, y así sucesivamente. En razón de tales repeticiones, las tríadas basadas en el número atómico son exactas en la mitad de todos los casos posibles.

Tomemos el cloro como ejemplo. Para encontrar un elemento con propiedades químicas similares debemos avanzar 18 posiciones hasta llegar al bromo. Para alcanzar otro elemento que comparta propiedades químicas similares, hemos de progresar 18 posiciones más, hasta el yodo. El bromo se encuentra entre el cloro y el yodo en relación con su número atómico, porque la longitud de los dos períodos entre estos elementos es exactamente la misma: 18 elementos. Pero en otras tríadas potenciales, el segundo y tercer elementos no se hallan en períodos de la misma longitud; la tríada ya no funciona.

Llenar los huecos

Mendeléiev criticaba el uso de las tríadas y, sobre todo, la hipótesis de Prout sobre la existencia de una materia prima. Mendeléiev se hallaba convencido de la individualidad y la existencia diferenciada de los elementos. Dejó huecos en su tabla periódica para elementos que no se habían aislado hasta la fecha y pronosticó muchas de sus propiedades, sobre todo, del galio, el germanio y el escandio.

Hay aspectos del sistema de Mendeléiev que son poco conocidos, pero que resultaron decisivos para su planteamiento. En repetidas ocasiones, Mendeléiev señaló que el concepto de elemento encierra un doble sentido. Por un lado, los elementos son el resultado final del análisis químico, es decir, algo que puede aislarse, aunque no simplificarse más. Esa es la noción de elemento que propuso Antoine Lavoisier en el siglo XVIII, cuando los denominó "sustancias simples".

Pero hay una segunda interpretación del concepto de elemento. Mendeléiev utiliza también la expresión "elementos reales", que les concede un estatuto más fundamental. Desde ese punto de vista, los elementos representan sustancias abstractas que carecen de lo que suelen considerarse propiedades; son la forma que los elementos adoptan cuando se encuentran integrados en los compuestos. Sea por caso el sodio y el cloro; en tanto que sustancias simples (un metal gris y un gas verdoso,

Elemento	Peso atómico	Reactividad frente al agua
litio Li	6,94	Poca reactividad, sin llama, sin explosión
sodio Na	22,99	Reactividad intermedia, produce una llama amarilla y una explosión débil
potasio K	39,10	Reactividad intensa, produce una llama lila y una fuerte explosión



3. LOS ELEMENTOS LITIO, SODIO Y POTASIO forman una tríada del tipo que estudió Johann Döbereiner en 1817. Los elementos integraban una tríada si, según los valores de la época, la media del peso atómico del primero y el tercero de los miembros se aproximaba al peso atómico del elemento intermedio. Asimismo, la reactividad del elemento central debía ser intermedia entre la del primero y el último. En la tabla periódica moderna, esa tríada es parte del grupo de los metales alcalinos. Las muestras reales de esos elementos (*derecha*) se conservan en aceite debido a que reaccionan violentamente con el agua y el aire.

respectivamente), no se hallan presentes en el cloruro de sodio ("sal de cocina"). Mendeléiev habría dicho que el sodio y el cloro están presentes en el compuesto en cuanto elementos abstractos o "reales".

Cabe subrayar que esos elementos abstractos son verdaderos; de hecho, deben considerarse más fundamentales que los elementos vistos como sustancias simples que pueden aislarse. Mendeléiev otorgaba sólo un atributo a los elementos abstractos: el peso atómico. Es el peso atómico del sodio el que mantiene su identidad cuando éste entra en una combinación química. En la medida en que Mendeléiev afirmaba que la versión abstracta del concepto de elemento era más real, estaba poniendo de relieve que su clasificación periódica concernía, en primer término, a los elementos abstractos.

Esa visión más filosófica de los elementos pudo haber concedido ventaja a Mendeléiev sobre sus competidores, que limitaron su atención a los elementos como sustancias simples. Ello explicaría también por qué Mendeléiev cuestionaba el valor del peso atómico de numerosos elementos y el modo en que varios elementos se habían acomodado en el sistema periódico. Hazaña que se obtuvo ignorando las propiedades más obvias y superficiales de los elementos, las que resultan evidentes cuando se consideran sustancias simples.

Suele afirmarse que la fama de Mendeléiev como "padre de la tabla periódica" le viene de su predicción de elementos por descubrir. ¿En qué medida resultaron acertadas sus predicciones? Para el galio, el germanio y el escandio, el éxito fue rotundo, hasta el punto de que Mendeléiev corrigió algunos de los resultados experimentales obtenidos con anterioridad sobre esos elementos.

Pero en conjunto el talento profético de Mendeléiev dejaba mucho que desear. De un total de 18 elementos que pronosticó, se aislaron sólo nueve —algunos creen que no deberíamos perdonar a Mendeléiev un número tan elevado de fracasos.

No está tampoco claro que fueran el éxito de las predicciones de Mendeléiev lo que hizo que la comunidad científica aceptara la tabla periódica. La medalla Davy, que precedió al premio Nobel como el honor más alto en química, se otorgó conjuntamente a Mendeléiev y Julius Lothar Meyer, su principal competidor, quien no había realizado ninguna predicción. En el discurso de recepción del premio, no se aludió a las predicciones de Mendeléiev. Por tanto, parece que la medalla Davy se concedió a la forma en que los dos químicos colocaron, en sus respectivos sistemas periódicos, los elementos conocidos hasta la fecha. El galardón no se relacionó con las predicciones.

La física teórica ha proporcionado una explicación parcial de la estructura y la existencia de la tabla de Mendeléiev y de sus descendientes modernos. Desde el punto de vista de la física, los electrones que orbitan el núcleo de un átomo son los responsables de las propiedades químicas del mismo. Los átomos de los elementos que pertenecen a un grupo o columna de la tabla se comportan de forma semejante porque poseen el mismo número de electrones en la capa más externa. La concepción de electrones organizados en capas proviene de la mecánica cuántica. Se supone que la energía

Elementos	Peso atómico
Hidrógeno (H)	1,0
Berilio (Be)	10,9
Boro (B)	11,7
Carbono (C)	12,0
Nitrógeno (N)	12,6
Oxígeno (O)	16,0
Flúor (F)	9,6
Sodio (Na)	93,3
Magnesio (Mg)	50,0
Aluminio (Al)	55,0
Silicio (Si)	49,0
Fósforo (P)	27,0
Azufre (S)	32,0
Cloro (Cl)	70,0
Potasio (K)	156,0
Calcio (Ca)	82,0
Titanio (Ti)	28,8
Cromo (Cr)	113,0
Manganeso (Mn)	113,0
Hierro (Fe)	111,0
Cobalto (Co)	117,0
Níquel (Ni)	117,0
Cobre (Cu)	128,0
Cinc (Zn)	128,0
Arsénico (As)	134,0
Estroncio (Sr)	178,0

4. UN INTENTO PRECOZ DE CLASIFICACION relacionaba el peso atómico de los elementos con el del hidrógeno, que se consideraba la unidad. Alrededor de 1815, William Prout formuló la siguiente hipótesis: dado que el peso atómico de muchos elementos parecía ser un múltiplo entero del peso atómico del hidrógeno, quizá todos los elementos se componían de múltiples hidrógenos. Los pesos atómicos que se muestran en esta tabla corresponden a los valores que se conocían en la época de Prout (no son exactos de acuerdo con los criterios actuales).

BARBARA AULICINO (*arriba, izquierda y abajo*); MARTYN F. CHILLMAID/*Photo Researchers, Inc.* (*arriba, derecha*)/*American Scientist*



5. FERNANDO DUFOUR ha trasladado el sistema periódico al espacio tridimensional. Su sistema *ElemenTree* (“árbol de los elementos”), creado en 1990, pone de relieve semejanzas químicas que abarcan varios grupos de la tabla bidimensional estándar.

de los electrones está cuantizada, es decir, que los electrones ocupan un conjunto de niveles energéticos, u orbitales, cada uno con un valor específico y discreto de energía.

Además, las soluciones de la ecuación que propuso Erwin Schrödinger se caracterizan por un conjunto de números cuánticos. Cuando a ese conjunto se le añade un número cuántico adicional para el espín, se predice que las capas electrónicas de cada átomo contienen un máximo de 2, 8, 18 o 32 electrones. Esa conclusión está en concordancia con la longitud de los períodos de la tabla periódica. Sin embargo, la teoría cuántica no explica la repetición de la longitud de todos los períodos con excepción del primero. De hecho, hasta tiempos recientes, los físicos teóricos no habían logrado explicar ese patrón.

Valentin Ostrovsky publicó una teoría que daba razón de tales repeticiones, aunque no todos la aceptan. Su trabajo (cuyo desarrollo matemático es demasiado complejo para exponerlo aquí) y otras propuestas alternativas demuestran que la tabla periódica continúa siendo, 140 años después, un área de investigación activa de físicos y químicos.

Terreno abonado

Químicos, físicos y filósofos de la ciencia debaten las virtudes de las distintas formas de representar el sistema periódico. Algunos cuestionan que una tabla bidimensional sea un criterio idóneo de ordenar los elementos. Los químicos suelen opinar que no existe una representación mejor que otra y que la cuestión de la representación es un asunto de conveniencia y convención. Algunos filósofos de la ciencia discrepan. Creen que puede existir un modo óptimo de ordenar los elementos en grupos y columnas; las controversias relativas al lugar que ocupan en el sistema periódico ciertos elementos “problemáticos”, como el hidrógeno o el helio, tienen una solución, a pesar de que no se conozca todavía.

Según esa visión, unas representaciones del sistema periódico serían superiores a otras. A pesar de que el diseño más común de la tabla, denominado “de longitud media”, presenta algunas virtudes, coloca al helio entre los gases nobles. Hay quien propone que, a pesar de las apariencias, el helio debería colocarse a la cabeza del grupo 2, el de los metales alcalinotérreos, con el berilio, el magnesio y el calcio. El helio posee dos electrones en su capa más externa, igual que los metales alcalinotérreos.

Asimismo, el orden de llenado de las capas electrónicas se representa mejor mediante el agrupamiento de la tabla periódica “escalonada por la izquierda”. Debemos esa forma del sistema periódico a Charles Janet. Avanzada en los años veinte, la ha resucitado Gary Katz. Otro argumento a favor de esa tabla es que presenta el sistema periódico de una forma más ordenada que la disposición tradicional. En la versión escalonada por la izquierda hay dos períodos de dos elementos, en lugar de uno, con lo que todas las longitudes de períodos, sin excepción, se repiten.

El autor ha propuesto otra tabla periódica en la que el hidrógeno se encuentra a la cabeza de los halógenos. Además, esa tabla se ha organizado de modo que el grupo que ahora comienza con el hidrógeno aparece en el borde izquierdo. La principal ventaja de esta ordenación reside en su mayor regularidad, que refleja más fielmente la esencia de la ley periódica. Esa tabla modificada presenta dos períodos iniciales de ocho elementos; evita, por tanto, el aspecto anómalo del período integrado por sólo dos elementos.

El principal atractivo de la presentación estriba en la formación de una tríada perfecta a que da lugar y que incluye al hidrógeno. Además, mantiene la tríada perfecta del helio, lo que no acontece en la tabla escalonada por la izquierda, que la pierde. Pero, ¿cuál es el interés de crear nuevas tríadas perfectas? Esas estructuras se fundan sólo en el número atómico, el único criterio que define los elementos, cuando se consideran sustancias fundamentales en lugar de sustancias simples. Mendeléiev insistió en que el sistema periódico era, ente todo, una clasificación de sustancias fundamentales (“elementos reales”).

En más de una ocasión, esa concepción más filosófica de los elementos ha venido al rescate de la química como disciplina autónoma. Sugiere que la química posee un fundamento filosófico, a pesar de que suele admitirse que éste se reduce a la física cuántica y, por tanto, que la química carece de carácter filosófico. En los albores del siglo XX, cuando se descubrieron los isótopos de numerosos elementos, pareció que la cantidad de “elementos” (o sustancias simples) que podían aislarse se había multiplicado. Algunos químicos creyeron que esa proliferación marcaría la desaparición de la tabla periódica, para dar paso a una tabla de isótopos.

Friedrich Paneth y otros reconceptualizaron la noción de elemento. Lo hicieron de un modo que evitaba el abandono de la tabla periódica química. Paneth apeló a la distinción de Mendeléiev entre “elementos reales” y elementos concebidos como sustancias simples. Fijando la atención en los “elementos reales” —como lo había hecho Mendeléiev—, aunque caracterizándolos por su número atómico, el químico ignoraría el hecho de que los “elementos” se presentan en varias centenas de

ERIC SCERRI/*American Scientist*

El autor

Eric R. Scerri, profesor de química e historia y filosofía de la ciencia en la Universidad de California en Los Angeles, Es fundador y director de la revista *Foundations of Chemistry*. Obtuvo su doctorado en historia y filosofía de la ciencia en el King’s College de Londres.

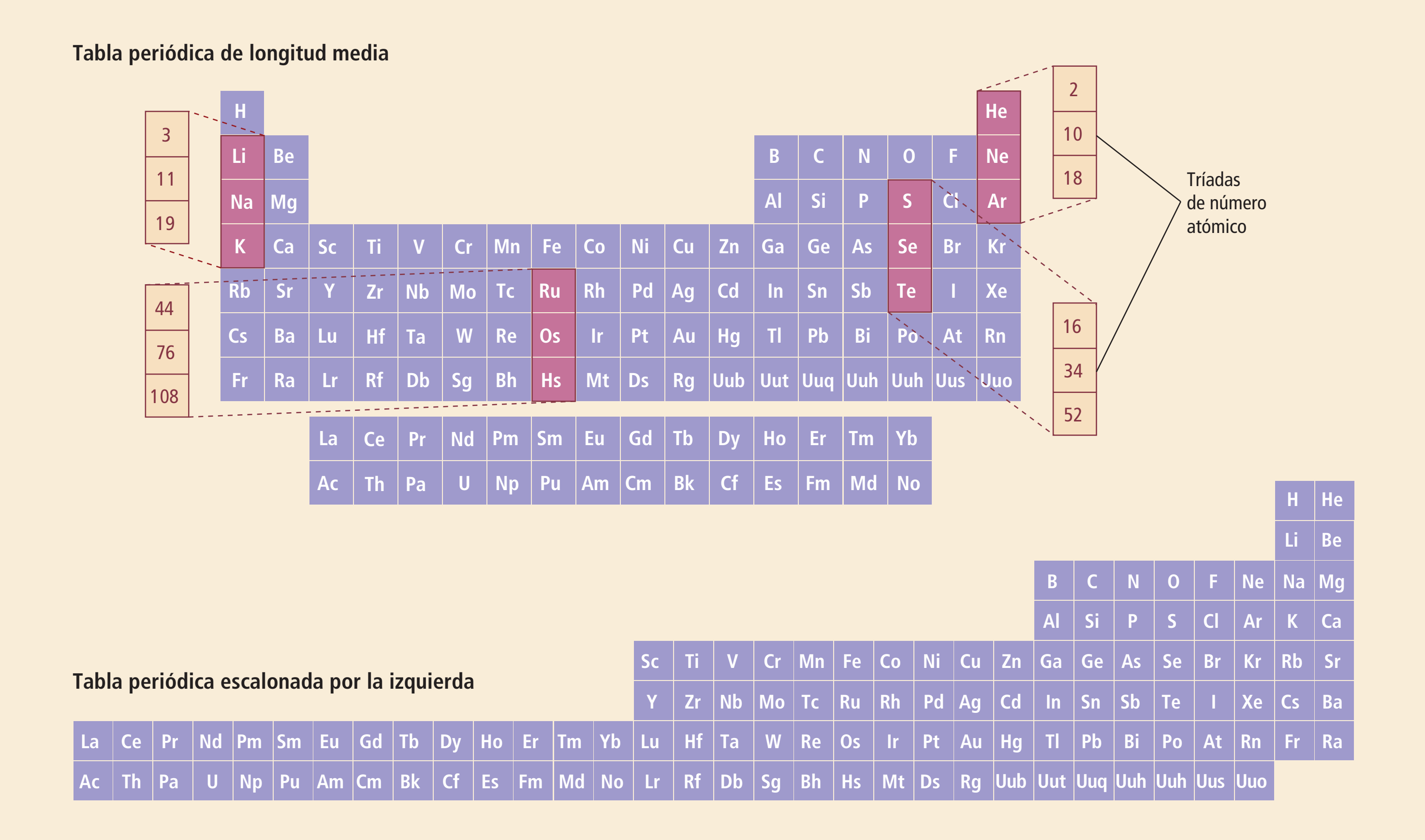


Tabla periódica de Scerri

Tríada: 1, 9, 17

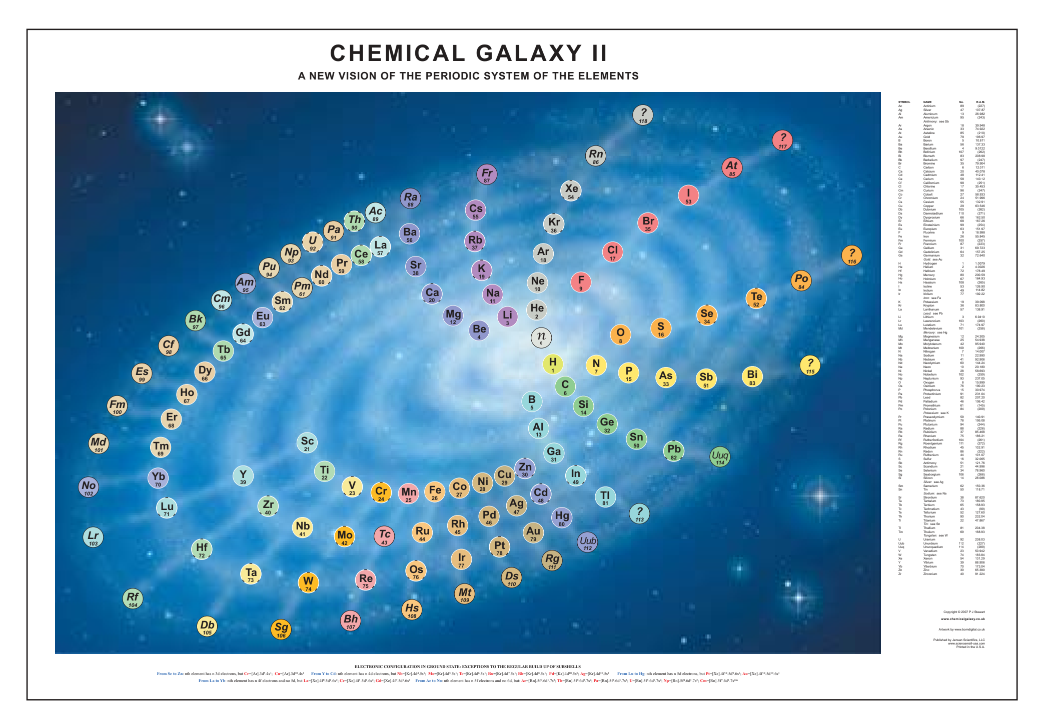
H	He	Li	Be											B	C	N	O
F	Ne	Na	Mg											Al	Si	P	S
Cl	Ar	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se
Br	Kr	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te
I	Xe	Cs	Ba	Lu	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po
At	Rn	Fr	Ra	Lr	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Rg	Uub	Uut	Uuq	Uuh	Uuh
Uus	Uuo																
		La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb		
		Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No		

6. LA TABLA PERIODICA MODERNA, en su forma estándar o “de longitud media” (*arriba*), presenta los elementos en filas, en orden creciente de número atómico (el número de protones del núcleo). Cada fila constituye un período, de longitud variable. Cada columna corresponde a un grupo de elementos que presentan propiedades químicas similares, lo que guarda relación con el número de electrones de la capa más externa, o de valencia, de los átomos. Los lantánidos y actínidos, situados en las dos filas de la parte inferior, se representan separados de los elementos bario (Ba) y radio (Ra), con el fin de conseguir un aspecto global más compacto. Se han destacado en la tabla algunas tríadas (*rosa*), originalmente relacionadas por el peso atómico, si bien lo son además en términos de números atómicos (*beis*).

La tabla “escalonada por la izquierda” (*en el medio*) constituye una propuesta alternativa que coloca al helio con los metales alcalinotérreos, dado que todos ellos cuentan con dos electrones en su capa de valencia. Además, sigue el orden de llenado de las capas electrónicas.

El autor ha propuesto otro diseño (*abajo*): el hidrógeno encabeza el grupo de los halógenos, que se sitúan en el borde izquierdo de la tabla. Esta disposición evita el aspecto anómalo que produce el período de dos elementos en la tabla de longitud media; se basa en la maximización de las tríadas de números atómicos, como la que forman el hidrógeno, el flúor y el cloro (*rosa*), que no aparece en otras tablas.

7. PHILIP STEWART, de la Universidad de Oxford, aboga por una representación en espiral del sistema periódico. Esta forma continua evita los cortes entre períodos que presenta la tabla al uso. Las formas espirales se han considerado desde hace más de un siglo. Este póster muestra la adaptación particular de Stewart: se denomina "galaxia química" porque la longitud creciente de los períodos guarda semejanza con los brazos radiales de una galaxia espiral.



CORTESIA DE PHILIP STEWART Y CARL WENCZEK DE BORN DIGITAL LTD./*American Scientist*

isótopos. Los isótopos se considerarían entonces sustancias simples, nada más. Dado que los isótopos del mismo elemento tienden a manifestar propiedades químicas idénticas (con pocas excepciones como el hidrógeno), quedaba justificada esta aproximación.

Quizá las innovaciones más radicales que ha propuesto la investigación contemporánea sobre el sistema periódico reciban su aliento de quienes cuestionan la idoneidad de las representaciones bidimensionales y del formato de tabla. Al menos tres sistemas periódicos tridimensionales se han desarrollado y comercializado para servir de útiles didácticos. El *ElemenTree* ("árbol de los elementos"), de Fernando Dufour, pone de relieve semejanzas químicas que no se incluyen en la tabla tradicional.

Por ejemplo, los elementos del grupo 13 de la tabla "de longitud media", como el boro, el aluminio y el galio, presentan valencia (capacidad de combinación) de tres. Sin embargo, existen otros elementos con esa misma propiedad: los del grupo 3, que comprende el escandio, el itrio y el lutecio. En el sistema de Dufour, todos esos elementos quedan en el mismo plano bidimensional, que puede representarse como un corte a través del sistema tridimensional de clasificación.

Otro diseño, recuperado y promovido por Philip Stewart, de la Universidad de Oxford, corresponde a un formato en espiral. La propuesta ha despertado interés. A diferencia de la tabla tradicional (que implica quiebras entre los gases nobles, situados en el borde derecho, y los metales alcalinos, en el borde izquierdo), los sistemas en espiral resaltan la continuidad de la secuencia de elementos.

Visto en retrospectiva

¿Podría ser que nuestra dependencia de las formas bidimensionales del sistema periódico se deba al predominio, hasta épocas recientes, de la página bidimensional del libro de texto y de la bidimensionalidad de las paredes de las aulas? Después de todo, un sistema tridimensional no es fácil de representar en un libro, ni en la pizarra. Con la llegada de las técnicas modernas, el famoso icono de Mendeléiev quizá se transformará en algo que ni él mismo reconocería.

De hecho, Mendeléiev consideró los modelos espirales, pero fracasó en su constitución. En la opinión de Stewart, si Mendeléiev hubiera prestado mayor atención a las formas espirales, quizás habría añadido la predicción de una familia completa de gases nobles a sus otros famosos vaticinios de elementos aislados. Tal y como señaló William Crookes hace más de un siglo, en una disposición espiral de los elementos, la posibilidad de que existan los gases nobles resulta obvia.

La tabla periódica comenzó con el reconocimiento de las tríadas y se desarrolló en los tiempos de la hipótesis de Prout sobre la unidad de toda la materia. Desde esos orígenes numéricos y filosóficos, ha evolucionado hacia una herramienta práctica. Pero sus aspectos filosóficos no han sido del todo eclipsados; permanecen en la base del sistema periódico y, de vez en cuando, salen a la superficie para arrojar luz sobre cuestiones aplicadas y relacionadas con la identidad y la representación gráfica del mismo.

Bibliografía complementaria

THE PERIODIC SYSTEM OF CHEMICAL ELEMENTS: A HISTORY OF THE FIRST HUNDRED YEARS. J. W. van Spronsen. Elsevier; Nueva York, 1969.

WHAT AND HOW PHYSICS CONTRIBUTES TO UNDERSTANDING THE PERIODIC LAW. V. Ostrovsky en *Foundations of Chemistry*, págs. 145-182; 2001.

THE SPIRAL PERIODIC SYSTEM. P. Stewart en *Education in Chemistry*, vol. 41, pág. 165; 2004.

THE PERIODIC TABLE: ITS STORY AND ITS SIGNIFICANCE. E. R. Scerri. Oxford University Press; Nueva York, 2007.

El castor austral

El castor norteamericano fue introducido en la isla Grande de Tierra del Fuego hace más de 60 años, para su aprovechamiento como recurso peletero. Desde entonces, ha causado grandes alteraciones en el bosque

Marta Lizarralde, Julio Escobar, Guillermo Deferrari y Mariana Fasanella

El castor, habitante obligado de zonas ribereñas, es un roedor semiacuático, el segundo de mayor tamaño del orden de los roedores. Se le considera un "agente natural" de alteración del ecosistema por esa actividad que tanto lo caracteriza: el corte de ramas y troncos de árboles para la construcción de diques, canales y madrigueras, que realiza con notable precisión hidráulica. Estos trabajos lo diferencian del resto de los herbívoros; ningún otro animal modifica tanto su entorno.

Presenta adaptaciones morfológicas a la vida semiacuática: sus orejas y nariz tienen válvulas que se obturan cuando se sumerge; puede cerrar los labios detrás de sus prominentes incisivos, lo que le permite cortar madera debajo del agua; la cola, escamosa, con forma de paleta, es apta para la natación, construcción de diques y madrigueras, y además constituye una reserva lipídica.

Aunque el origen del género *Castor* es desconocido, se sabe de su existencia en Europa a fines del Mioceno (que acabó hace unos 5.300.000 años), en Norteamérica a mediados del Plioceno (el período siguiente, que terminó hace alrededor de 1.800.000 años). *Castor* es el único género viviente de la familia Castoridae, representado sólo por dos especies: *Castor canadensis,* en Norteamérica, y *Castor fiber,* en Eurasia. Ambas derivan de un ancestro común. Llevan aisladas 9000 años, quizás 24.000. Dos líneas ancestrales del género *Paleocastor*, *Trogontherium* en Eurasia y *Castoroides ohioensis* en Norteamérica, forma gigante, del tamaño de un oso negro, sobrevivieron hasta el Pleistoceno (que abarca desde el fin del Plioceno hasta hace 115.000 años); parece que dieron lugar a las especies actuales. Las dos especies existentes se semejan externamente, aunque se cree que *Castor fiber* es la más arcaica. El cariotipo —el juego de cromosomas— de *canadensis* habría derivado del de *fiber;* se trataría de un caso de especiación por reordenamiento cromosómico.

La desaparición del castor de su hábitat original se atribuye a su exterminio por la caza intensiva, en pos de su valiosa piel. En los últimos siglos los castores estaban entre las especies de mamíferos de mayor distribución geográfica. Se estima que, antes de la llegada de los europeos a Norteamérica, la población superaba los 60 millones de individuos; quizá fuese incluso de 400 millones. Ocupaban todo tipo de hábitat acuático, desde el Artico hasta el norte de México.

Su introducción en el archipiélago de Tierra del Fuego

Históricamente, muchas regiones frías del mundo, sobre todo del hemisferio norte, han basado su desarrollo en el aprovechamiento de pieles silvestres. En el extremo insular más austral del continente sudamericano no ocurrió lo mismo. Por esta razón se introdujo en 1946 la especie *Castor canadensis* en los ecosistemas naturales de la isla Grande de Tierra del Fuego (Argentina). Los ejemplares procedían de Canadá. Se buscaba contar con más animales de piel valiosa. Promovió la operación el Ministerio de Marina, que autorizó la suelta de 25 parejas de castores en la cuenca inferior del Río Claro, situada en la zona boscosa de la isla Grande.

Es indudable que la población introducida encontró desde un primer momento condiciones habitacionales y alimentarias óptimas. La falta de predadores y competidores naturales facilitó su expansión, el incremento de su población y su conversión en especie invasora del ecosistema austral. En 1983, el gobierno de Tierra del Fuego decidió regular la caza comercial para controlar el crecimiento de la población. Sin embargo, esta decisión no cuajó y el castor se expandió rápidamente por todo el archipiélago magallánico, acarreando aún

CONCEPTOS BASICOS

- Hace más de sesenta años, se introdujo deliberadamente el castor en la isla Grande de Tierra del Fuego, con la intención de explotar su piel. El animal se ha extendido desde entonces por todo el archipiélago, donde ha causado notables alteraciones en el medio.
- Hay dos especies de castor, *Castor canadensis* y *Castor fiber*. Los castores de Tierra del Fuego pertenecen a *C. canadense*. Viven en colonias de cinco individuos, por lo normal. A los dos años de edad, los juveniles emigran para fundar nuevas colonias.
- Los castores fueguinos son un ejemplo típico de los problemas que causa la introducción de una especie nueva en un medio.



1. *CASTOR CANADENSIS* ha invadido las islas del archipiélago de Tierra del Fuego.

CORTESIA DE C. BRICEÑO

más modificaciones ambientales. En 1969 el castor cruzó el canal Beagle e invadió la isla Navarino. Desde allí se extendió al resto del archipiélago: atravesó la península Dumas, cruzó a la isla Hoste y paulatinamente fue colonizando la isla Dawson, en el océano Pacífico, y las demás islas del canal Beagle.

Nuestro grupo de trabajo, del Centro Austral de Investigaciones Científicas en Ushuaia, estudia, desde 1988, las alteraciones que ha causado la introducción del castor en una región donde no vivía. Es un ejemplo típico de que la introducción de especies representa siempre un riesgo para la preservación de la biodiversidad.

El área de estudio

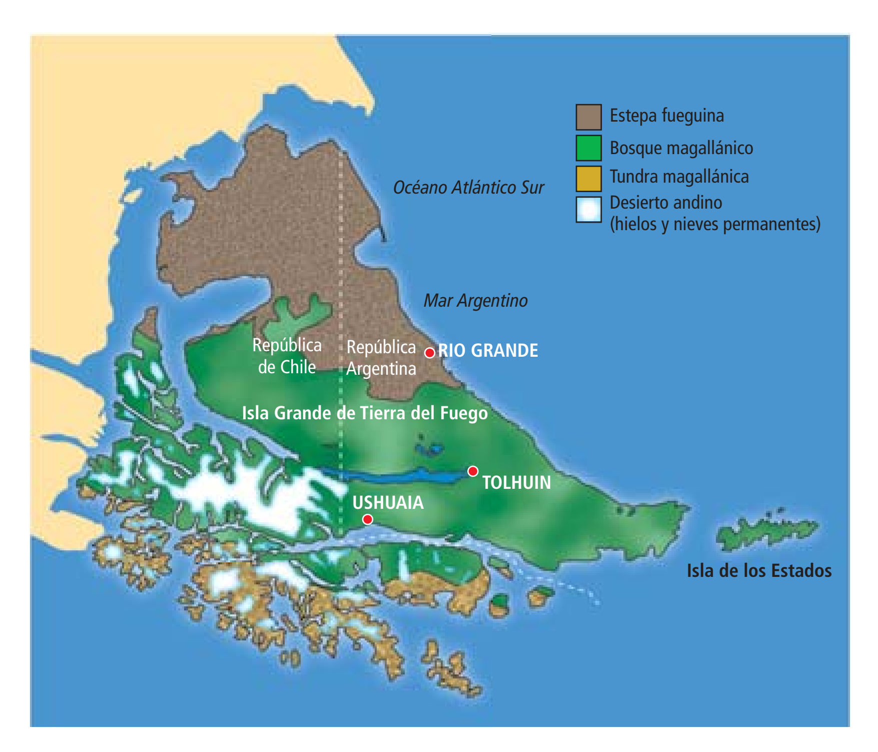
El archipiélago de Tierra del Fuego está situado en el extremo austral del continente sudamericano. Lo constituyen cientos de islas distribuidas entre los océanos Atlántico y Pacífico. A la isla Grande corresponde la mayor superficie, unos 40.000 km^2; las características insulares y la influencia antártica le confieren un clima frío y húmedo, extremo para muchos organismos.

En particular, en la isla Grande se distinguen tres ambientes, que se caracterizan por su relieve y vegetación. La región andina es montañosa, con cuencas amplias y extensos cursos de agua de origen glacial. Domina la vegetación un bosque perenne de *Nothofagus betuloides* (el guindo), que alterna con turbales de *Sphagnum* sobre las costas del canal Beagle. El ecotono, o área de transición, presenta suaves ondulaciones influenciadas por la glaciación; la vegetación está dominada allí por un bosque deciduo de *Nothofagus pumilio* y *Nothofagus antarctica* (lenga y ñire) y amplias vegas de *Carex*. Por fin, la estepa o región extraandina presenta características topográficas y de vegetación típicas de la estepa patagónica.

La dinámica poblacional del castor austral

Reconocimientos aéreos y terrestres, imágenes tomadas por satélite y censos realizados durante el otoño, sobre todas las cuencas de la isla Grande, permitieron determinar qué terrenos había colonizado el castor y su dinámica poblacional. También se evaluaron los datos indirectos de colonización del hábitat: huellas, acumulación de alimento, montículos territoriales, restos de madera, etcétera.

Se determinó la población de toda la isla Grande mediante el cómputo de los sitios de colonia, es decir, de los estanques o serie de estanques de una misma cuenca. En cambio, el número de colonias activas, utilizadas por una familia o grupo de castores a lo largo del



2. FITOGEOGRAFIA de la isla Grande de Tierra del Fuego.

año, sólo se determinó en sitios del Parque Nacional, para compararlo después con datos del bosque boreal. El número promedio de animales por colonia se estableció gracias a los datos de tramperos que habían cazado todos los animales de alguna colonia. Se midió el largo, ancho y alto de los diques para calcular la superficie media de los estanques, el volumen potencial de acumulación de sedimento y las áreas afectadas. Se tomaron datos del forrajeo y de los diámetros de los troncos cortados en "transectos" (secciones longitudinales) perpendiculares al estanque, desde el agua hasta el último árbol cortado. Se cartografió la ubicación de los estanques y las características geomorfológicas de las cuencas colonizadas para determinar el patrón de ocupación en cada cuenca.

Se capturaron, vivos o muertos, cincuenta ejemplares de la población con trampas, a fin de obtener muestras de sangre, tractos reproductivos, cráneos y trozos de tejidos frescos (hígado, bazo y músculo), que fueron utilizadas para estudios mastozoológicos, reproductivos y genéticos. Se realizaron análisis cromosómicos y moleculares de secuencias de ADN mitocondrial. Se recogieron en el campo cráneos y muestras de tejidos de animales muertos (fallecidos por causas naturales o matados por tramperos). Todas las muestras de tejidos y los cráneos se depositaron en la colección mastozoológica del Laboratorio de Ecogenética (CADIC-CONICET) en Ushuaia, Tierra del Fuego.

Actualmente, el castor ocupa el 98 % de los ríos de la isla Grande: ha invadido casi todas las cuencas andinas y extraandinas del sistema hidrológico. Si bien no existe información reciente sobre el estado de la población de castor en las demás islas del sector chileno, podemos afirmar que en la actualidad este roedor vive en casi todo el archipiélago magallánico, de 70.000 km^2.

La especie se concentra, principalmente, en zonas del bosque con drenajes abundantes e intrincados —fondos de valle y turberas—, y abunda menos por las zonas esteparias. En particular, la mayor productividad de la especie se da en las áreas protegidas y en los turbales, necesitados de acciones de conservación urgentes.

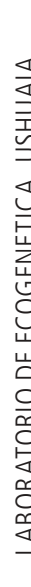
Se calcula que en la isla Grande hay más de 50.000 individuos y de 4 a 5 sitios de colonia por kilómetro de ribera. La densidad de colonias en actividad es de 0,7/km^2, con un promedio de 5 individuos por colonia. Estas densidades son similares a las registradas en áreas del hemisferio norte que ya han alcanzado un equilibrio. En zonas muy colonizadas, como las de nuestros estudios, seguramente ocurrirá lo observado en aquéllas.

Es de esperar que, si la población aumenta, los efectos ambientales causados por la alta densidad (destrucción del hábitat, falta de alimento, etc.) operarán como factor inhibidor hasta que el crecimiento demográfico alcance un nivel asintótico: la capacidad de carga o población máxima, que puede soportar un ambiente. Nuestros estudios determinaron que la tasa intrínseca de crecimiento demográfico del castor en Tierra del Fuego es de 21 % a 23 %: es el ritmo a que crecería la población si no sufriese limitaciones ecológicas, es decir, si la capacidad de carga fuese infinita. De ahí se puede calcular una capacidad de carga de 35.000 animales. Estos datos, y la comparación con los valores del hemisferio norte mencionados antes, indican que las áreas de mayor productividad de la isla Grande se aproximan a su capacidad de carga.

Estructura poblacional y reproducción

La estructura de la población austral muestra que el mayor porcentaje (65 %) de individuos lo constituyen crías menores de 1 año y juveniles o prerreproductivos de 1 a 3 años, mientras que la población restante (35 %) corresponde a adultos de más de 3 años. La edad adulta máxima observada en condiciones naturales fue de 14 años. Al igual que en las poblaciones del hemisferio norte, los juveniles de 2 años dejan la colonia paterna en busca de sus propios territorios; ésa es, por lo tanto, la edad de reclutamiento de los juveniles en las nuevas áreas invadidas. Es indudable que la población de castor podría experimentar grandes cambios

3. AQUI SE VEN CORTES DE CASTOR en un tronco (*a*), árboles derribados en el bosque (*b*), estanques en laderas (*c*) y acumulaciones de sedimentos (*d*).



si la supervivencia o la tendencia a emigrar de los individuos de 2 a 3 años de edad se modificasen, dada la alta mortalidad a la que se halla expuesta esta clase de edad. Se tiene ahí un mecanismo de regulación poblacional, que moderaría las altas densidades mediante un aumento de la tasa de dispersión.

Los ejemplares australes pesan entre 4 y 30 kg; los juveniles tienen un peso medio de 10 kg y los adultos, de 23 kg. La longitud total media de los adultos es de 101,85 cm; la de los juveniles, de 87 cm. La característica más notable corresponde a la cola, aplanada en forma de remo, de 23 a 33 cm de largo y de 11 a 18 cm de ancho.

Los órganos sexuales del castor son internos; no presentan diferenciación externa del sexo. El pene se detecta por palpación; en período de lactancia, se reconoce a las hembras por la presencia de cuatro mamas pectorales. En la zona austral, la proporción de sexos se acerca, en condiciones naturales, al uno a uno. El período reproductor comienza en junio y se extiende hasta septiembre, con un pico en julio. La observación de crías de casi dos meses a comienzos del verano austral da a entender que nacen en primavera, entre septiembre y noviembre. Considerando el inicio del período, la gestación tiene una extensión de 90 a 100 días. La camada comprende de media 3,37 animales y no consta que haya más de una camada al año.

Organización social y alimentación

La colonia está constituida por un grupo o familia de castores que ocupa un estanque o sucesión de estanques en un curso de agua y utiliza un suplemento alimenticio común al que denominamos "*comedero*" (*figura* 4). Los castores son monógamos. La colonia está constituida por la pareja de padres, crías menores de 2 años nacidas durante el período reproductivo anterior y las nacidas durante el período actual, menores, pues, de 1 año. La media del número de individuos es, como ya dijimos, de cinco.

Este tipo de colonia representa la unidad funcional de la población, pero su número y





4. LOS CASTORES construyen reservorios alimenticios para el invierno, denominados comederos, como estos de Tierra del Fuego.

LABORATORIO DE ECOGENETICA, USHUAIA

composición puede variar según la calidad del hábitat. Un ejemplo: en el Parque Nacional Tierra del Fuego se registraron colonias ocupadas sólo por uno o tres individuos, y en algunos pocos casos hasta por seis. También en el hemisferio norte se han registrado números variables de animales por colonia, lo cual se atribuye no sólo a la calidad del hábitat, sino a diferencias entre las poblaciones naturales y las manipuladas.

La alimentación del castor es exclusivamente vegetariana. Incluye sobre todo corteza, hojas y ramas de especies leñosas. El ñire (*Nothofagus antarctica*), la lenga (*N. pumilio*), el coihue (*N. betuloides*), el canelo (*Drymis winteri*) y arbustos de los géneros *Pernettya, Berberis, Chiliotrichum, Gunnera, Marsippospernum* y *Juncus* son los vegetales que los castores forrajean en la Tierra del Fuego. Durante el verano y la primavera fueguina, el consumo de vegetación herbácea es considerable. La tala de árboles y arbustos se hace más intensa durante el otoño, cuando el material es convenientemente trozado y almacenado bajo el agua cerca de la madriguera, como reservorio alimenticio para el invierno o comedero.

Análisis genético

El estudio cariológico —es decir, de los cromosomas— de la población de Tierra del Fuego no mostró polimorfismos cromosómicos en sus individuos. Los análisis indicaron que el cariotipo tiene un número diploide de 40; es decir, consta de veinte pares de cromosomas. Todos esos cromosomas son bibraquiales metacéntricos. En metafase, la fase del ciclo celular en que esta empieza su duplicación, los cuatro brazos son iguales y unidos en un punto, salvo 4 de los pares, que son submetacéntricos (dos de los brazos son más cortos). El cromosoma sexual X es un metacéntrico grande; el Y, en cambio, es uno de los cromosomas más pequeños. El cariotipo de los ejemplares analizados concuerda con los datos publicados para los del hemisferio norte, salvo en lo que se refiere a los cromosomas sexuales: el X austral es más variable y aparece como un cromosoma totalmente metacéntrico. Por otra parte, datos recientemente publicados de secuencias de ADN y ARN muestran la existencia de varios haplotipos, o linajes fundadores en una muestra de la población del Parque Nacional.

Los cambios genéticos que podrían haber intervenido en la población de Tierra del Fuego cuentan con la ventaja de dos circunstancias favorables para su fijación: ausencia de flujo génico, a causa del aislamiento geográfico, y acción del endocruzamiento. Por esa razón, estudiarlos resulta útil a la hora de analizar los procesos evolutivos vinculados a la especiación.

El castor austral modifica paisajes y nutrientes

Los principales efectos del castor sobre el ecosistema austral de Tierra del Fuego se detectan en los bosques de ladera, en particular en las áreas de ribera, y también en vegas húmedas y turbales. La formación de estanques en terrenos planos o aterrazados incrementa el área de las vegas, con amplias zonas de inundación. En valles planos construyen estanques cuyo tamaño oscila entre 12 y 16 hectáreas. La superficie media de los estanques que construyen en valles de ladera es de 2600 m², aunque el

CASTORES EN EUROPA

Hubo castores en España hasta el siglo XVII. En 2003 volvió a avistárselos en el río Aragón, donde ahora ya han colonizado decenas de kilómetros de ribera. Los gobiernos de La Rioja y Navarra consideran que su presencia se debe a una suelta deliberada ilegal. Por ello, de acuerdo con el gobierno de España, han decidido erradicar al recién llegado castor. Como es un animal protegido, han tenido que solicitar permiso a la Comisión Europea, que lo ha concedido. Recurrirán a las capturas con trampas, y, si no bastase, a la caza. En Baviera, el castor se reintrodujo hace más de cuarenta años, en el Danubio. Ahora hay miles de ejemplares por buena parte de la región —la zona danubiana a la altura de Ratisbona es el centro del área colonizada, pero también hay castores en el Isar y el Inn—, y se los puede ver incluso en núcleos urbanos. Cuando su presencia interacciona mal con actividades humanas, se capturan los ejemplares, que luego se llevan a otros países centroeuropeos para que también cuenten con poblaciones de castores. Otra concentración importante es la del Elba, donde subsistieron algunos castores autóctonos, y hay núcleos menores en otros ríos alemanes, como el Rin. En Suiza y Austria también se ha reintroducido el castor en decenios recientes. Por otra parte, en Finlandia, donde se produjeron sueltas ya en los años treinta, corretean miles de castores canadienses. Una pequeña población superviviente en Noruega ha medrado de un tiempo a esta parte.



© *iStockphoto*/HADLEIGH THOMSON

tamaño depende de la geomorfología de la cuenca; así, en los valles de pendientes pronunciadas, típicas de esos bosque, se observan áreas ribereñas alteradas por los castores de alrededor de 400 m² (*figura 5*).

Los restos de madera de árboles caídos y cortados por el castor producen una acumulación de material orgánico que modifica la composición química del agua, del suelo y del sedimento del estanque y de las zonas ribereñas adyacentes. Se observaron alteraciones en la dinámica de los elementos orgánicos, tanto principales como secundarios, presentes en las muestras de sedimentos y de agua de estanques pertenecientes a sitios modificados por los castores. Las muestras se comparan con las tomadas de sitios de control, que no habían sido modificados por los castores.

Los sitios modificados se seleccionaron por el tipo de hábitat, de material orgánico acumulado, de régimen hidrológico y de vegetación dominante; además, estaban libres de perturbaciones de origen humano. Los sitios de control eran sectores de cuenca con ausencia histórica de colonización por castores. Las muestras se recogieron estacionalmente de octubre a mayo entre 1991 y 1994, para determinar las concentraciones de carbono orgánico, nitrógeno orgánico, fósforo orgánico, nitritos (NO_2^-), nitratos (NO_3^-), amonio y fosfatos.

En total, los diques del bosque de Tierra del Fuego pueden retener un volumen de sedimentos de entre 684 y 120.000 m³. Durante los períodos estacionales de inundación, cuando los estanques se desbordan, deben de liberarse nutrientes. La acumulación de elementos principales varía entre los sitios alterados y no alterados por los castores. Los estanques de castor almacenaron 7 veces más carbono, 3,5 veces más nitrógeno y 1,85 veces más fósforo orgánicos que los controles. Las concentraciones de nitrógeno inorgánico (NO_2^-, NO_3^-), fueron también significativamente más altas en los sitios de castor.

Es indudable que, poco tiempo después de su introducción en la isla Grande de Tierra del Fuego, el castor tuvo una sorprendente expansión poblacional que produjo alteraciones ambientales de importancia. Son numerosas las que ha sufrido el bosque austral. Así, se ha destruido el bosque de ribera, lo cual desestabiliza el suelo y causa marcados efectos erosivos en el resto del bosque. El régimen de luz, por la abertura de claros, ahora es distinto. Se ha modificado la estructura del hábitat y de la biota acuática; predominan algas (*Diatomea*, *Cyanophyta* y *Clorophyta*), salmónidos introducidos y comunidades de invertebrados típicos de aguas lentas; además, han aparecido nuevos sitios de nidificación de aves migratorias. Humedales, valles y vegas húmedas han conocido una notable expansión, por los cambios en el drenaje y en la profundidad de la capa freática. La acumulación de sedimento y materia orgánica ha modificado los principales ciclos de nutrientes de las cuencas y zonas de ribera.

Los autores

Marta S. Lizarralde es doctora en ciencias naturales de la Universidad Nacional de La Plata (UNLP) e investigadora científica del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas de Argentina (CONICET). Ha dirigido el laboratorio de ecogenética del Centro Austral de Investigaciones Científicas (CADIC-CONICET), en Ushuaia, Tierra del Fuego. Actualmente dirige el laboratorio de ecología molecular del Centro Regional de Estudios Genómicos (CREG) de la UNLP. **Julio M. Escobar** es profesional técnico de apoyo del CONICET y asistente de investigación en el CADIC (Ushuaia). **Guillermo A. Deferrari** es doctor en ciencias biológicas de la UNLP y profesional de apoyo del CONICET en el CADIC (Ushuaia). Desarrolló su tesis doctoral bajo la dirección de Lizarralde sobre especies invasoras de Tierra del Fuego. **Mariana Fasanella** es licenciada en ciencias biológicas de la Universidad de Buenos Aires (UBA) y asistente de investigación en el CADIC (Ushuaia) y en el CREG (UNLP). Realiza su estudio de posgrado sobre el análisis genético y espacial de invasoras.

5. EN ESTAS FOTOGRAFIAS se aprecian los efectos que las actividades del forrajeo del castor tienen en los bosques de ribera.





LABORATORIO DE ECOGENETICA, USHUAIA

Bibliografía complementaria

CURRENT STATUS OF THE BEAVER (*CASTOR CANADENSIS*) INTRODUCED IN TIERRA DEL FUEGO (ARGENTINA). M. Lizarralde en *AMBIO*, vol. 22, págs. 351-358; 1993.

ESTUDIOS CROMOSOMICOS EN EL CASTOR Y LA RATA ALMIZCLERA DE TIERRA DEL FUEGO. M. Lizarralde, S. Deferrari, S. Alvarez y J. Escobar. Actas VIII Jornadas Argentinas de Mastozoología; Bariloche, 1993.

NUTRIENT DYNAMIC ALTERATIONS INDUCED BY BEAVER (*CASTOR CANADENSIS*) ON SOUTHERN FOREST ECOSYSTEM. M. Lizarralde, S. Deferrari, S. Alvarez y J. Escobar en *Ecología Austral*, vol. 6, pág. 2; 1996.

PLAN DE MANEJO DE LA ESPECIE *CASTOR CANADENSIS*. M. Lizarralde y J. Escobar. Informe Técnico Sub. De Rec. Naturales; Gobierno de la Prov. De Tierra del Fuego, 1999.

INVADER SPECIES OF ARGENTINA: A REVIEW ABOUT BEAVER (*CASTOR CANADENSIS*) POPULATION SITUATION ON TIERRA DEL FUEGO ECOSYSTEM. M. Lizarralde, J. Escobar y G. Deferrari en *Interciencia*, vol. 29, n.º 7, págs. 352-356; 2004.

ASSESING GENETIC VARIATION AND POPULATION STRUCTURE OF INVASIVE NORTH AMERICAN BEAVER (*CASTOR CANADENSIS* KUHL, 1820) IN TIERRA DEL FUEGO (ARGENTINA). M. Lizarralde, G. Bailliet, S. Poljak, M. Fasanella y C. Giulivi en *Biological Invasions DOI* 10.107/s10530-007-9161-6. 2007.

Controlar los castores

Las alteraciones producidas por el castor austral son equiparables a las ocasionadas por el castor boreal, que también transforma mucho su ambiente. En líneas generales, las perturbaciones debidas a las actividades del castor no son insólitas ni impredecibles. Cuando no se ejerce ningún control sobre el castor, sus actividades pueden afectar a gran parte de los cursos de agua y cambiar el paisaje por décadas o siglos, incluso indefinidamente. Por tanto, nuestros estudios sugieren que se mitiguen los efectos producidos por el castor con una gestión planificada en las áreas de mayor productividad de la especie en la Tierra del Fuego, que precisamente son las principales para la explotación forestal. El incremento de la población se controlaría mediante el trampeo y extracción de animales.

La propuesta se sustenta en los datos sobre tendencia, tasa de crecimiento y estado poblacional obtenidos por nuestro grupo, y cuenta además con el éxito de la captura de castores con trampas tipo Conibear (modelo 330), que indica que la extracción podría realizarse en forma intensiva. Cabría sobreexplotar sostenidamente la especie por su condición de invasora. Conviene aclarar que, por su excelente adaptabilidad y por la manera en que se dispersa y distribuye, hay dos tipos de limitaciones que impedirían erradicarla de forma definitiva del archipiélago fueguino: las de orden técnico —ningún plan de erradicación, por trampeo o caza, permitiría extraer el 99,99 % de la población— y las de orden económico, ya que supondría costos que ningún programa de control puede sufragar a largo plazo. La solución sería un plan que pueda mantenerse a lo largo del tiempo: controlaría el crecimiento poblacional y mitigaría las alteraciones que este singular invasor produce.

Un físico con acción a distancia

Anton Zeilinger hace malabarismos con los enigmas del mundo cuántico. Crea interferencias entre macromoléculas, genera protones entrelazados y transmite datos cuánticos a muchos kilómetros de distancia

Michael Springer



1. EL FISICO EXPERIMENTAL Anton Zeilinger (*derecha*), en diálogo con el autor, Michael Springer.

Quien visita a Anton Zeilinger en su Instituto de Optica e Información Cuánticas (IQOQI), en Viena, entra en un lugar cargado de historia. El conjunto de edificios de la calle Boltzmann albergaba ya en tiempos de la monarquía institutos de física; en el techo resalta una corona y sobre la entrada todavía se podían vislumbrar en los años sesenta, cuando estudié allí física teórica, las huellas de las letras k.u.k. (*kaiserlich und königlich*, imperial y real). Sólo un par de pasos, y uno se halla en las escaleras de Strudlhof, que dieron nombre a la más famosa novela del escritor austriaco Heimito von Doderer.

Mi visita a Viena resultó cargada de historia también en un sentido estrictamente biográfico. Como se puso de manifiesto en la conversación, Zeilinger no sólo estudió en la misma facultad, sino incluso en el mismo instituto que yo, y allí nos impartió el entusiasmo por el estudio de la naturaleza el mismo profesor de física. Pero, mientras a mí la vida me llevó a pisar de nuevo las escaleras de Strudlhof, pero de camino a la literatura y al periodismo, Zeilinger se dedicaría, con perseverancia y un éxito extraordinario, a una serie de depurados experimentos sobre las cuestiones fundamentales de la física cuántica. Esas investigaciones han causado sensación en el mundo entero.

Aparte de la fina destreza que requieren, la principal originalidad de sus trabajos reside en que conviertan en reales los experimentos mentales de que echan mano los teóricos cuando tratan de interpretar la teoría cuántica. Este puente entre teoría y experimento es, en sí mismo, destacable, pues parece que dentro de la física se dan dos culturas, teórica una y experimental la otra. La pura teoría es una continuación del anhelo de la *philosophia naturalis* —expresión que figura en el subtítulo de la obra de Newton “Principia mathematica”, el texto fundacional de la mecánica teórica— con medios matemáticos y físicos. La física experimental, por el contrario, está ligada, por su naturaleza, a la práctica y a la técnica. Lo normal es que los físicos sean o teóricos o experimentales; sin embargo, Zeilinger ha venido practicando algo así como una teoría experimental.

En especial, ha venido abordando la cuestión de si se ha de explicar dentro de la física clásica el “entrelazamiento” de los estados cuánticos a distancias macroscópicas, como querían Einstein y Schrödinger, o de si se trata



TODAS LAS FOTOS SON DE JACQUELINE GODANY/*Spektrum der Wissenschaft*

Anton Zeilinger nació en 1945 en Ried (Austria). Estudió en la Universidad de Viena física y matemáticas. Se doctoró en 1971 con una tesis sobre física de neutrones. Su equipo fue el primero en comprobar una interferencia cuántica entre macromoléculas. Desde los años noventa investiga las partículas luminosas entrelazadas y su utilización para transmitir información cuántica (el llamado teletransporte o teleporte). Zeilinger ha sido profesor del Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT), de la Universidad Técnica de Múnich, de la Universidad Técnica de Viena, de la Universidad de Innsbruck y del Colegio de Francia de París. Actualmente es el director científico del Instituto de Optica e Información Cuánticas (IQOQI) y decano de la Universidad de Viena.

de un fenómeno específicamente cuántico y no local, según sostenían Bohr y Heisenberg. Zeilinger ha demostrado en la práctica que realmente existe esa "fantasmagórica acción a distancia", como despectivamente la denominó Einstein en el legendario debate acerca de la mecánica cuántica, para el que recurrió a menudo a los experimentos mentales. El equipo de Zeilinger logró transmitir con fotones entrelazados información cuántica a través del Danubio, y después a más de cien kilómetros de distancia, entre dos islas del archipiélago canario. Puesto que las partículas cuánticas idénticas (a diferencia de las clásicas) son en principio indiscernibles, esta transferencia de información equivale a un "teletransporte", "teleportación" o "teleporte", como en la serie televisiva *Star Trek*. Zeilinger ha logrado así traducir a una praxis experimental los debates teóricos sobre el extraño mundo de los cuantos. De sus trabajos sacan provecho ramas importantes de la investigación, entre ellas la criptografía y computación cuánticas.

Michael Springer: Profesor Zeilinger, ¿cómo se le ocurrió ser científico?

Zeilinger: Siempre me han interesado tanto las cosas, que los demás se maravillaban. Vivíamos en el campo, en la baja Austria, y mi padre era maestro en una pequeña escuela agraria. Llevaba allí un laboratorio químico. Era un buen científico: más tarde sería profesor de la Escuela Superior Agrícola. De tanto en tanto yo tenía que ir con él al laboratorio; no me extrañaba, pues, que hubiese quien se dedicara a investigar. Excitó mi curiosidad.

Vivíamos en un palacio, en una vivienda para profesores que había allí; era el mismo edificio que albergaba la escuela. Tenía habitaciones amplísimas. Una medía 150 metros cuadrados. En invierno no había forma de calentarla, no había dinero para ello por entonces; al despertarme por la mañana, el agua del vaso que tenía junto a la cama estaba helada. ¡Cosas que pasan! (*ríe*).

Yo miraba por la ventana del segundo piso de ese caserón. Enfrente tenía la vaquería y un gran establo, que también formaban parte del centro de enseñanza. La ventana tenía rejas y me aferraba a ellas para que no se me escapara nada. Permanecía allí durante tantas horas mirando afuera, que la gente del pueblo decía "a éste le pasa algo". Está claro que desde un principio recibí en herencia esa raíz de la ciencia: el asombro.

MS: Así llega un niño a interesarse por la naturaleza y por las personas que la estudian. Zeilinger, usted es un experimentador, pero su trabajo se caracteriza por llevar a la práctica experimentos mentales de los teóricos.

Zeilinger: Desde muy pronto me gustaron los trabajos manuales, pero no para construir algo que funcionara (eso nunca me ha interesado), sino para saber cómo funcionaban las cosas. Les desmontaba los brazos y las piernas a las muñecas de mi hermana porque quería saber cómo eran por dentro.

Después, en el instituto, se fomentó ese interés fundamental. Era un instituto humanístico. Había para mí dos puntos culminantes en las clases. Uno era la física; tuve la fortuna de que la enseñase un profesor de física realmente fascinante. En nuestros días la pedagogía es una disciplina importante en las universidades. Enseña las técnicas pertinentes, pero, en mi opinión, suele llegar demasiado tarde. Habría que hacer investigación de campo, ver qué profesores entusiasman a los alumnos y aprender de ellos. Considero secundaria cualquier otra cosa, incluido el aprendizaje con programas de ordenador. Soy un acérrimo enemigo de los apuntes en clase.

El otro punto fuerte era el griego. Leíamos la *Antígona* de Sófocles y la *Apología de Sócrates*; descubrí así que los problemas humanos, del individuo, eran hace dos mil quinientos años exactamente los mismos que hoy. También ahí, pues, me encontré con cuestiones fundamentales.

MS: ¿Cómo se ha llegado a que, en su caso, se hayan ligado tan estrechamente en una persona teoría y experiencia?

Zeilinger: Para mí, la diferencia no está entre teoría y experimentación, sino entre quienes plantean cuestiones fundamentales y quienes quieren hacer algo muy concreto. Se podría decir que estos últimos se dedican al bricolaje, tanto si montan un experimento como si deducen algo teóricamente; entre los teóricos hay tantos que no sienten interés por las cuestiones fundamentales como entre los experimentadores, ni más ni menos. Y eso también es bueno.

Lo ocurrido durante la segunda guerra mundial y después no sólo condujo a que los físicos emigrasen de Europa, sino a sus grandes éxitos en la investigación militar. Se vio que con nuestro bricolaje creábamos cosas que resultaban decisivas en la guerra. Así adquirió el aspecto pragmático de la física un peso mucho mayor del que le correspondía. En EE.UU. escasean los físicos que no se inclinan hacia ese lado pragmático; pero los nuevos desarrollos sólo pueden proceder de posiciones fundamentales, de planteamientos profundos, en lo conceptual y filosófico. Sabemos que Einstein, Schrödinger, Heisenberg se ocuparon muy a fondo de la filosofía. El contraejemplo fue Dirac, a quien le bastaba con calcular. Ambas posiciones son necesarias, pero en este momento me parece excesivamente reducido el lado fundamental en la física.

MS: ¿De dónde procede su predilección por los fundamentos?

Zeilinger: Trabajé durante años en EE.UU., en el Instituto de Tecnología de Massachusetts, y aprecié lo que aquí tenemos porque allí lo eché en falta. Es sabido que en Viena he fomentado —implícita, indirectamente— que se centre la formación universitaria en las cuestiones fundamentales. En última instancia, esta actitud nos remonta al Círculo de Viena, a Ernst Mach y a Ludwig Boltzmann, quien escribió en 1903 *Principien der Naturfilosofi* (“Principios de la filosofía”, con una peculiar ortografía).

MS: En nuestra época de estudiantes en la Universidad de Viena, la física estaba todavía en la facultad de filosofía y teníamos que pasar un examen de filosofía.

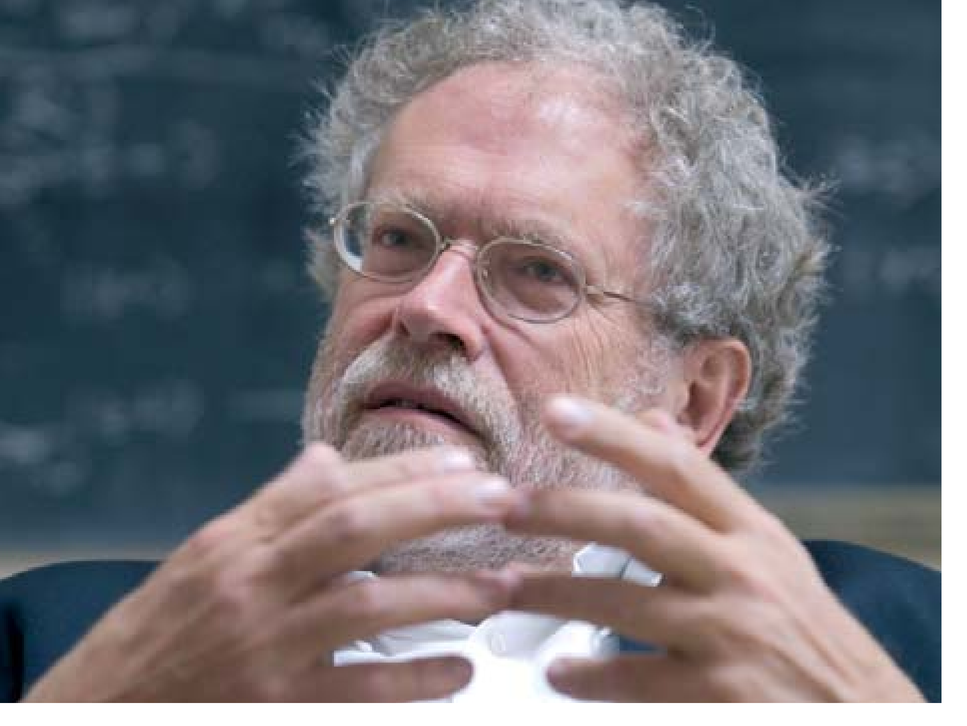
Zeilinger: ¡Cómo no! Además, en aquella época el plan de estudios era muy abierto. Considero infantil la organización académica de las universidades actuales, por culpa del Proceso de Bolonia. Se mira con lupa cualquier vicisitud, si se ha asistido a tres horas o a cuatro de mecánica cuántica. Es totalmente irrelevante. En mi carrera no asistí ni a una sola hora de clase de mecánica cuántica. La aprendí yo solo con libros, en aquellos tiempos aún no existía Wikipedia, ¡por suerte!, porque los libros son mejores. Pero en el examen oral del doctorado le había dicho con anterioridad al examinador: “examíneme de mecánica cuántica, quiero aprenderla”.

MS: Sus trabajos ratifican sin excepción las predicciones de la mecánica cuántica y refutan todos los intentos de explicarlas mediante un enfoque realista clásico. Ahora bien, hoy hay más de una forma de interpretar adecuadamente la mecánica cuántica (la interpretación de Copenhague, la teoría de los muchos mundos y el modelo de la “decoherencia”). ¿Por cuál se inclina? ¿Me equivoco si tengo la impresión de que usted es un partidario de la interpretación “ortodoxa” de la escuela de Copenhague?

Zeilinger: Contamos con una descripción teórica de la naturaleza de una precisión increíble.

El autor

Michael Springer es colaborador de *Spektrum der Wissenschaft*, edición alemana de *Scientific American*.



No hay ningún género de duda de que hemos hallado algo que es correcto y en muy buena medida, casi con toda seguridad, definitivo. Quizás un día haya un desarrollo que supere la mecánica cuántica, tal y como la teoría de la relatividad superó la mecánica newtoniana. Es probable que, conceptualmente, resultara aún más extravagante que la actual mecánica cuántica. Pero lo jocoso es que con ésta tenemos una descripción buenísima de la naturaleza, ¡y entonces se disputa por la manera en que se la debe interpretar! Eso denota que no hemos comprendido todavía, como se debiera, el "mensaje" conceptual.

En primer lugar, habría que partir de los mínimos conceptos posibles. En segundo, deberíamos abandonar las ideas clásicas. Sea la teoría de los muchos mundos, que se propone salvar el realismo clásico. Rescata la noción la existencia de una realidad dada e independiente del observador; lo hace de una forma un tanto extraña, mediante el reconocimiento de muchas realidades. Me parece un prejuicio clásico, seguramente insostenible. Algo similar le sucede a la interpretación de Bohm, que también quiere salvar el realismo clásico. Estoy convencido de que sólo podemos progresar si nos preguntamos por el menor número de supuestos que necesitamos. Y ahí está la interpretación de Copenhague, *the most austere one,* como escribí en cierta ocasión, la más económica.

MS: ...lo que Mach llamó economía mental...
Zeilinger: ... sí; o el principio de la navaja de Ockham. Una parte de nuestros experimentos trata de identificar qué conceptos de la mecánica cuántica han de mantenerse. Hace poco hemos ensayado una variante singular del realismo no-local. Y, por lo que hemos visto, tampoco funciona.

MS: Estos intentos, ¿tienen también consecuencias técnico-prácticas para lo que usted ha denominado "bricolaje"?
Zeilinger: Nuestros experimentos, como también los de otros, nacen de la curiosidad filosófica. Empezamos en la Universidad Técnica de Viena con la interferometría de neutrones, experimentos en los que, bajo la dirección de Helmut Rauch, pude colaborar. Más tarde seguimos con los fotones entrelazados. Y, para gran sorpresa nuestra, resultó que estos trabajos pioneros llegaron a ser fundamentales para la constitución de un dominio novedoso del procesamiento y transmisión de la información.

Si alguien me hubiera preguntado hace quince años para qué servía todo aquello, le hubiera respondido lisa y llanamente: para nada; es tan útil como la astronomía o una sinfonía de Beethoven, es pura ciencia y lo hacemos por mera curiosidad. Y, sin embargo, de ahí surgen ahora una gavilla de técnicas de la información y otras. Al campo de la información pertenecen la "criptografía cuántica", el "teleporte cuántico" y la "computación cuántica".

La situación es digna de una pieza de teatro didáctica de Brecht: en la historia de la física no ha sido raro que planteamientos de naturaleza fundamental llevasen a aplicaciones que no se habían imaginado quienes dieron los primeros pasos. Heinrich Hertz hizo sus famosos experimentos sobre la propagación de las ondas electromagnéticas, con lo que puso la clave de bóveda de la teoría de Maxwell, sin que quienes los sufragaron sospechasen potenciales aplicaciones. De ahí saldrían la radio, la televisión, la telefonía móvil. Nunca se insistirá lo suficiente a los políticos: si queréis situar bien a nuestro país a largo plazo, debéis fomentar la investigación básica, con independencia de las posibles aplicaciones.

MS: Volvamos a las cuestiones fundamentales. De un realismo local abolido por la física cuántica cabe extraer varias consecuencias en filosofía natural. ¿Cuál es su opinión sobre la cuestión del realismo?
Zeilinger: Para mí, y es opinión que se afianza cada vez más, el problema no es la localidad, sino el realismo. Existe un principio básico: no podemos explicar por qué en un experimento cuántico aparece tal resultado concreto y no otro, de entre los muchos posibles. Si tengo una superposición de muchas posibilidades pero acoplo el sistema a un aparato clásico, eliminaré la coherencia —la posibilidad de interferencia, de coexistencia, de entrelazamiento— entre las diversas posibilidades. Ahora bien, lo que no podré explicar será

por qué aparece precisamente tal resultado en un experimento determinado: si mido el espín en la dirección de las *z*, ¿por qué en un caso apunta hacia arriba y en otro hacia abajo? No hay modelo clásico que lo justifique, salvo en el caso trivial de que el espín ya estuviera orientado en la dirección de las *z* antes de la medición.

En mi opinión, éste es uno de los descubrimientos más importantes de la física moderna. Puedo explicar algo causalmente sólo en conjuntos estadísticos, pero no en un suceso aislado. En el salón de actos de la Academia austriaca de las Ciencias, en la antigua universidad, puede leerse bajo una alegoría de la filosofía el lema *causarum investigatio*. Mas para el suceso aislado no hay ninguna *causa*, ninguna explicación causal. Sólo por el resultado de la medición se da después una realidad. Si mido el espín, obtengo, digamos, un espín arriba, y a partir del momento en que se tiene el resultado de la medición, éste es real en el siguiente sentido: si hago otra vez el mismo experimento, obtendré el mismo resultado.

Es un supuesto central de toda descripción de la naturaleza: si mido lo mismo inmediatamente, una vez tras otra, ha de resultar lo mismo; de lo contrario, el concepto de realidad no tendría el menor sentido. Sospecho que éste es un punto absolutamente central, que debe mantenerse en cualquier mecánica cuántica que supere a la actual. ¡Pero antes de llegar ahí sólo se tiene la no realidad! ¡Antes, el sistema no tenía ningún espín bien definido!

MS: ¿Ninguno en absoluto?

Zeilinger: El sistema tenía un estado mecanicocuántico. Estaba en una superposición o, incluso, en una mezcla de las diversas posibilidades. En el suceso aislado mecanicocuántico se origina esa realidad concreta que vemos en él; y de forma aleatoria, sin descripción causal posible. Pero en ese momento se aniquila otra realidad. Si el espín está en la dirección del eje de las *x* y lo mido a lo largo del eje *z*, obtendré un resultado inequívoco; la realidad en la dirección de las *x*, sin embargo, quedará aniquilada por la medición.

MS: Si la física cuántica está próxima a una interpretación no-realista, ¿quiere esto decir que nos hemos de acostumbrar a que la realidad no es sólo material, sino que incluye una componente inmaterial, "espiritual"? Usted suele subrayar que la información, que ocupa una especie de posición intermedia entre lo material y lo espiritual, es el concepto fundamental.

Zeilinger: Estoy convencido de que el concepto fundamental de nuestro mundo es el de información. La información establece qué puede decirse y también qué pueda ser la realidad. En la concepción habitual del físico, al igual que en la vida cotidiana, la realidad existe ahí, ante nosotros, primaria; por esa realidad nos paseamos como si fuera un escenario y la información no es más que una noción derivada, secundaria. En la física cuántica, al menos en determinadas situaciones, la información es, tengo esa convicción, lo primario: lo que puede ser dicho.

La información que aporta un sistema cuántico es limitada, es finita. De ello se pueden deducir buenas razones de que existan el azar, la incertidumbre, el entrelazamiento. He escrito en uno de mis libros que hemos de abandonar la separación entre información y realidad. En tanto que físicos, hemos aprendido que debemos renunciar a las disociaciones que no podamos sustanciar operativamente (por ejemplo, espacio y tiempo en la teoría de la relatividad, campo eléctrico y magnético en la teoría de Maxwell, o mecánica terrestre y celeste en la física de Newton). Análogamente, información y realidad podrían ser dos caras de la misma moneda. No se puede hacer ningún enunciado sobre la realidad sin hablar de información. Ambas están imbricadas. Qué significa esto en última instancia, todavía no lo sabemos.

MS: ¿Es algo así como cuando Kant afirma que nuestro aparato cognoscitivo preforma lo que podemos conocer? Es decir, algo de lo que identificamos como "ahí fuera" está propiamente "aquí dentro" de nosotros. Espacio y tiempo son, según Kant, pre-formas de la captación de la realidad que no deberíamos



2. Zeilinger explica uno de sus experimentos.

GLOSARIO

Física clásica: abarca las teorías anteriores a la introducción de la física cuántica; la mecánica de Newton, la teoría de la relatividad de Einstein y la teoría de Maxwell del electromagnetismo.

Entrelazamiento: es un fenómeno cuántico sin análogo clásico. Por ejemplo, bajo determinadas condiciones dos fotones constituyen, tras abandonar sus lugares de origen, un sistema interconectado, con un estado cuántico común.

Realismo local: para Einstein, un requisito imprescindible de cualquier teoría física razonable. Los fenómenos físicos tenían que ser no sólo "reales" —independientes del proceso de observación—, sino también "locales", es decir, separables, en principio, de otros fenómenos.

Navaja de Ockham: así llamada en honor a Guillermo de Ockham (1285-1349). Este principio establece que entre teorías que compiten siempre hay que preferir la que introduce de partida menos entidades.

Interpretación de Copenhague: formulada por el físico danés Niels Bohr y otros, niega que el realismo local rija en el mundo cuántico. El proceso de medición altera, pues, el objeto de medición de tal forma que ya no se puede hablar de una realidad independiente de la observación. El fenómeno del entrelazamiento de partículas demuestra, además, la no localidad del mundo cuántico: si se mide una de las dos partículas entrelazadas, no sólo esa partícula adopta un estado definitivo, sino simultáneamente también la partícula compañera entrelazada, incluso cuando están distanciadas de modo que no pueden intercambiarse señal alguna entre ellas.

Teoría de Bohm: intenta salvar el realismo; para ello sacrifica la localidad. El comportamiento cuántico de partículas en sí reales en el sentido clásico se explica por "parámetros ocultos" y un campo guía no local.

Teoría de los muchos mundos: describe el proceso de medición como una partición en tantos mundos como posibles resultados de las mediciones cuánticas haya. En cada uno de estos mundos hay un observador que establece como real uno de los posibles resultados.

Modelos de decoherencia: describen el proceso de medición como una acción recíproca físico-cuántica entre el entorno y el objeto de medición por la que su estado cuántico común sacrifica su coherencia y se transforma en una mezcla estadística de estados clásicos.

buscar afuera, en la cosa en sí, sino en nuestro aparato cognoscitivo.
Zeilinger: Preforma también lo que puede haber afuera.

MS: ¿Es que hay algo ahí fuera? ¿Tiene sentido preguntar por algo ahí fuera?
Zeilinger: Por supuesto. Aunque diga que información y realidad son dos caras de la misma moneda, no soy un idealista puro. No puedo ser ni un idealista, ni un reduccionista materialista.

MS: ¿No equipara información con realidad? ¿No dice usted: lo que hasta ahora hemos considerado como realidad es propiamente información?
Zeilinger: No, para mí eso sería demasiado idealista.

MS: Para usted, a la luz de la mecánica cuántica, ¿tiene la realidad una componente en cierto modo espiritual, como por ejemplo, predican desde tiempos inmemoriales las religiones mundiales? ¿Me permite que vaya al grano y le haga la pregunta que Margarita le hizo a Fausto?: ¿cómo llevas lo de la religión?
Zeilinger: ¿Disponemos de un par de horas? (*ríe*). Está claro que hay que diferenciar entre religión y Dios. Todas las religiones se resienten de que sean organizaciones mundanales que creen que han de cuidar las tradiciones. He discutido mucho con católicos (con los cardenales de Viena König y Schönborn), con el Dalai Lama, con ortodoxos griegos y con protestantes. Hay dos tipos de personas: unas, que en una conversación privada defienden sus propias posturas; otras, que aun en esos casos prefieren atenerse a la línea oficial.

También en estas tradiciones espirituales veo un camino del saber, paralelo al de la ciencia, en el que se puede aprender algo sobre el mundo. A mi entender, todo conflicto entre ciencia y religión es un malentendido. La discusión sobre evolución y creacionismo es intelectualmente espantosa, tanto por lo que defienden los fundamentalistas de la religión, en especial en los Estados Unidos, como también, en parte, por culpa de los científicos; ese libro de Richard Dawkins, *The God Delusion* (El espejismo de Dios), ¡es tan simplificador! Ni la religión ni las ciencias de la naturaleza podrían probar nunca la existencia de Dios ni refutarla.

Es como en el célebre chiste. Se entabla una disputa entre los escribas sobre qué prueba de la existencia de Dios es admisible, y, al cabo, el rabino más anciano, por todos respetado, dice: "¡No entiendo vuestra disputa! ¡El Señor es tan grande, que no necesita existir!" Me gusta la postura de Einstein: Dios es aquel principio del que provienen las leyes de la naturaleza, si bien yo puedo imaginarme un Dios que intervenga aun hoy en el mundo...

MS: ...en lo que no creía Einstein.
Zeilinger: Cierto. Por lo que sé, Einstein atribuyó a Dios una función tan sólo en el principio de todo.

MS: Según él, Dios puso en marcha este grandioso mecanismo de relojería, pero no interviene en su desarrollo, con ocasión de una plegaria, por ejemplo.
Zeilinger: Al menos sé que el mundo no es un mecanismo de relojería. La mecáni-

ca cuántica nos enseña que la comparación con un mecanismo de relojería es falsa. Los científicos nos han hablado menos de cómo debemos ver el mundo que de cómo no podemos verlo. Copérnico nos ha mostrado que la Tierra no está en el centro del universo. Darwin nos ha dicho que el ser humano no es singular.

MS: Los enunciados que cabe sostener son enunciados negativos. Después de Einstein, no hay ninguna posibilidad de distinguir entre masa inerte y masa pesante.
Zeilinger: Exacto. E igualmente es cierto que el mundo no es un mecanismo de relojería. Podría alguien devanarse los sesos acerca de las consecuencias teológicas de eso (*ríe*).

MS: Volvamos a lo que usted ha denominado la parte de bricolaje de la ciencia. Dedicarse al bricolaje es una ocupación honorable. Usted no es como Einstein, que trabajaba con papel y lápiz, sino un experimentador.
Zeilinger: Los experimentos son mi ocupación primordial. Las cuestiones filosóficas son intereses secundarios, una afición...

MS: ...si bien parte de un interés por los fundamentos.
Zeilinger: Sí; en su momento fue una decisión clave. Teníamos un plan de estudios muy libre, no había tesina. Creo que es una calamidad que se invierta tanto tiempo en la formación; la gente joven invierte demasiado tiempo hasta que acaba. Después, en Alemania, en Austria, han de escribir una tesina de licenciatura, que en parte ya está al nivel de una tesis doctoral. Lo considero superfluo.

Cuando me enfrenté a la decisión de dónde estudiar el doctorado, hice algo entonces inaudito: indagué por todas partes qué profesores de física eran considerados los mejores en Viena. Quedaron dos nombres: el teórico Walter Thirring (de la Universidad) y Helmut Rauch (de la Politécnica).

Rauch era una joven promesa, que experimentaba con la interferometría de neutrones, y me dirigí a él porque no quería perder el contacto con la realidad. Quería experimentar. Los trabajos meramente teóricos me parecían insuficientes. No hay nada más bello que estar en el laboratorio y ser el primero en ver un fenómeno. No es altanería, sino una sensación de felicidad; lo mismo debe de sentir un compositor cuando logra un bello pasaje.

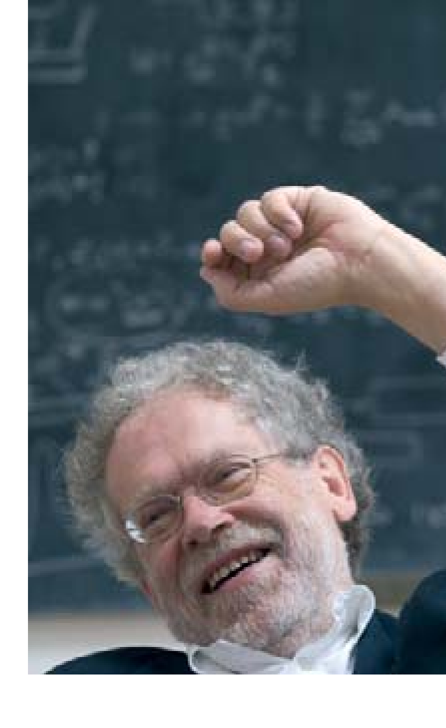
MS: Ahí se satisface la curiosidad del niño que tiempo atrás se aferraba a las rejas.
Zeilinger: Sí, ésa es la alegría del descubrimiento. Y ahora, el apasionante experimento de la comunicación cuántica a grandes distancias. ¡Qué bello es hacer algo así! Se pueden transmitir e identificar fotones sueltos entre puntos separados 144 kilómetros, entre dos islas (La Palma y Tenerife), aunque la otra isla sólo se vea borrosa y entre brumas; el estado mecanicocuántico se conserva del todo. Ahora, nuestro objetivo es la comunicación cuántica vía satélite. En este caso, no vamos a ser meros experimentadores que se hacen preguntas filosóficas: estamos preparando los aparatos necesarios para un experimento con satélites.

MS: ¿Tiene otros proyectos?
Zeilinger: Investigamos las palancas micromecánicas. Una diminuta palanca en una nanozona oscila a temperaturas normales. Ahora se intenta enfriarlas hasta el punto de que se puedan ver sus estados cuánticos. Sería la primera vez que un sistema mecánico —una palanca— muestra estados cuánticos. Queremos que se manifiesten entrelazamientos entre palancas y quizá se las pueda utilizar para el ordenador cuántico.

MS: Usted ya ha exhibido interferencias cuánticas en macromoléculas y ha anunciado que lo hará con virus, es decir, en la frontera de los seres vivos.
Zeilinger: Estoy convencido de que se puede hacer con seres vivos. No hay ninguna razón de principio por la que no deba funcionar. Esta área de trabajo sigue adelante, pero la he dejado por completo en manos de un joven colega, Markus Arndt.

MS: ¿Qué transmite usted a sus alumnos como quintaesencia de su praxis experimental?
Zeilinger: Siempre trato de destacar, de la forma más clara posible, un fenómeno singular, y de aislarlo, de volverlo contundente. De conclusiones intermedias entre dos bandas no se puede decir "¡así es!". Hay que identificar con claridad y con los medios más sencillos posibles. Veo un paralelo en las bellas artes: en pintura, representar los objetos con los medios más sencillos posibles, o en jazz transmitir el ritmo en el mínimo posible de compases.

No me doy por satisfecho si un experimento resulta sólo aproximado. Hay que investigar cada pequeño detalle, hasta que se entienda del todo. Para los experimentos que nosotros hacemos no ha de necesitarse después ningún otro experimento. *That's it*. No una prueba apresurada y ya veremos después; ése no es mi estilo. Ha dado muy buen resultado hacer las cosas con más precisión de la que parece necesaria. Así salen mejor y a veces se encuentra en el experimento lo que no se buscaba.



Bibliografía complementaria

EXPERIMENTAL TEST OF QUANTUM-NONLOCALITY IN THREE-PHOTON GREENBERGER-HORNE-ZEILINGER ENTANGLEMENT. Jian-Wie Pan et al. en *Nature*, vol. 403, pág. 515; 2000.

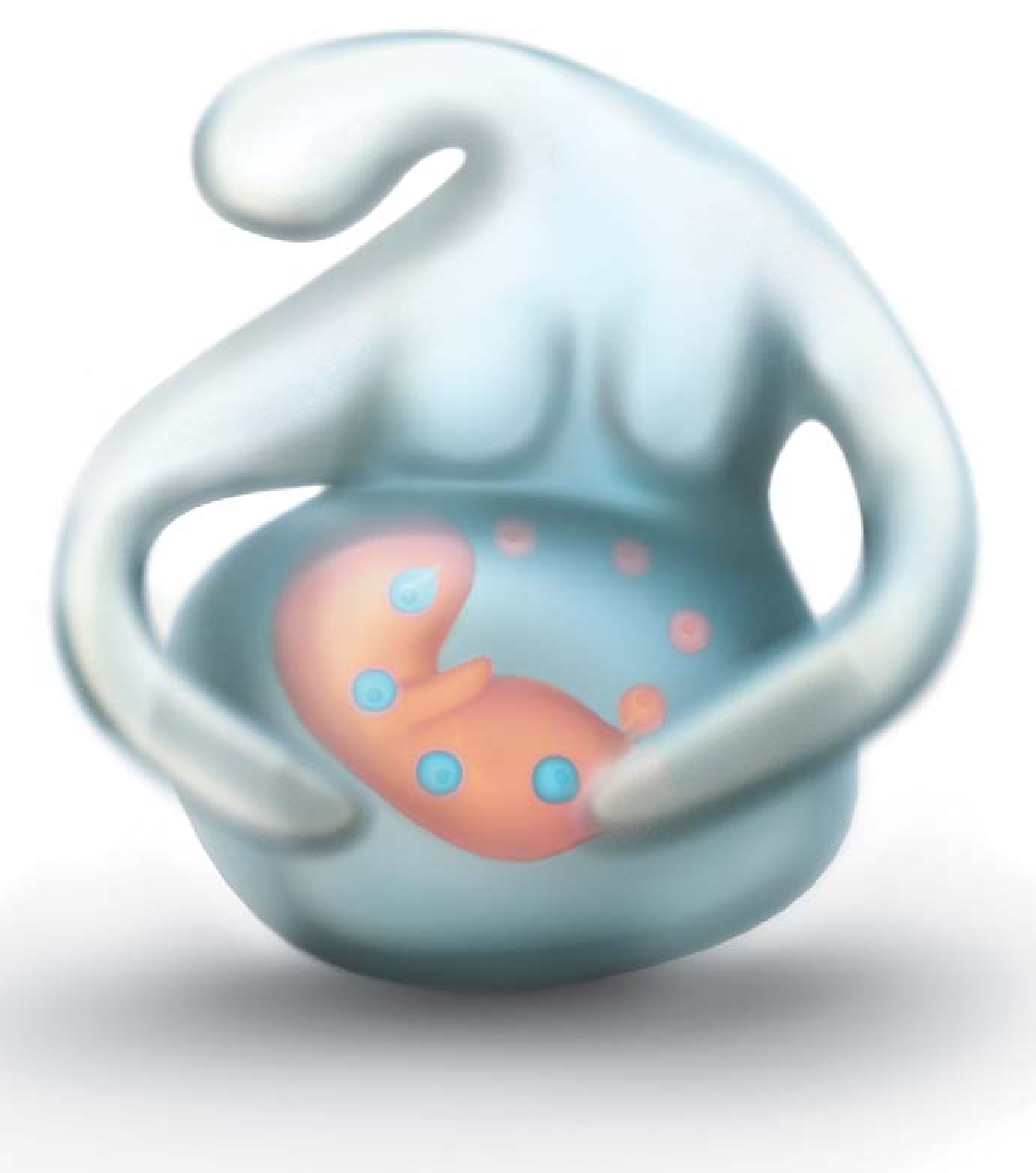
TELETRANSPORTE CUANTICO. Anton Zeilinger en *Investigación y Ciencia*, junio págs. 58-67; 2000.

EINSTEINS SCHLEIER. Anton Zeilinger. Goldmann, Múnich, 2005.

AN EXPERIMENTAL TEST OF NON-LOCAL REALISM. Simon Gröblacher et al. en *Nature*, vol. 446, pág. 871; 2007.

EINSTEINS SPUK. Anton Zeilinger. Goldmann, Múnich, 2007.

1. MICROQUIMERISMO BIDIRECCIONAL: Durante el embarazo, ciertas células pasan de la madre al feto y otras, del feto a la madre. Algunas persisten en el individuo de destino.



Microquimerismo

Muchas personas, si no todas, albergan cierto número de células procedentes de individuos genéticamente distintos: de su madre y, en el caso de mujeres que han estado embarazadas, de sus hijos. ¿Qué función cumplen?

J. Lee Nelson

"Soy muchedumbre", reza un verso del poema *Song of Myself*, de Walt Whitman. Aunque no fuera la intención del autor, el verso posee reminiscencias biológicas. La investigación sugiere que cada uno de nosotros posee, además de los billones de células que descienden del óvulo fecundado que fuimos, un conjunto de células procedentes de otros individuos genéticamente distintos. En el útero recibimos una partida de células procedentes de la madre. Las mujeres embarazadas se hacen con una muestra de células del embrión en desarrollo.

Que esas células atraviesen la placenta no resulta sorprendente. Después de todo, el tejido que conecta madre e hijo no es una pared impenetrable. Antes bien, se trata de una frontera selectiva que permite el paso de las sustancias necesarias para el desarrollo fetal. Lo que parece extraordinario es que esas células migratorias permanezcan en el nuevo huésped, ya sea circulando por su sangre o incorporándose a diversos tejidos. Cuando las células de una persona se entremezclan en el organismo de otra, hablamos de microquimerismo. Ese fenómeno centra en la actualidad el interés de la investigación médica. Opera, tal parece, como un arma de doble filo, pues contribuye a la salud y a la enfermedad. Una comprensión más honda de la actividad de las células transferidas permitiría aprovechar los efectos beneficiosos de esos polizones y, al propio tiempo, limitar su potencial lesivo.

BRYAN CHRISTIE DESIGN

De sorpresa en sorpresa

Se observaron los primeros indicios de que las células de una madre pasaban a su feto hace casi 60 años, cuando se publicó un trabajo que describía la transferencia de células cancerosas de la piel de la madre a la placenta y al feto. En los años sesenta, los biólogos se percataron de que también las células sanguíneas normales de la madre se abrían camino hasta el *nasciturus*.

Los datos que sugieren que las células cursan también en la otra dirección (del feto a la madre) se remontan todavía más atrás, hasta 1893, cuando cierto patólogo alemán descubrió indicios de esta transferencia en los pulmones de mujeres que habían fallecido a causa de un trastorno hipertensivo del embarazo. Sin embargo, no se hallaron pruebas de la incorporación de células fetales por parte de madres sanas hasta 1979, año en que el grupo de Leonard A. Herzenberg, de la facultad de medicina de la Universidad de Stanford, publicó un artículo ahora clásico sobre el descubrimiento de células masculinas (las que contienen un cromosoma Y) en la sangre de mujeres embarazadas de niños varones.

A pesar de conocer la existencia de ese tráfico celular bidireccional entre madre y feto, en el decenio de los noventa los biólogos volvieron a sorprenderse. Se halló que, con frecuencia, cierto número de las células foráneas sobrevivían de forma indefinida en individuos sanos. En estudios precedentes sobre transferencia

CONCEPTOS BASICOS

- Investigaciones recientes sugieren que cada uno de nosotros alberga células procedentes de otros organismos genéticamente distintos. El fenómeno se denomina microquimerismo. Conservamos células que adquirimos de nuestra madre durante la gestación; las mujeres que han estado embarazadas retienen células procedentes del feto.
- Las células adquiridas persisten durante decenios; pueden alojarse en los tejidos, convirtiéndose en parte integrante del organismo.
- El microquimerismo constituye un arma de doble filo: en unos casos desata un ataque inmunitario; en otros, facilita la curación del organismo. Ello convierte a las células adquiridas en dianas potenciales para terapias contra la autoinmunidad o para la regeneración de tejidos dañados.

de madre a hijo había quedado demostrado que las células maternas sobrevivían en niños afectos de inmunodeficiencia combinada grave (quienes sufren esa enfermedad carecen de las células que nos defienden de las infecciones). Pero el microquimerismo que presentaban esos niños se había atribuido a su enfermedad, en el bien entendido de que un sistema inmunitario sano destruiría cualquier célula materna que estuviese deambulando por su organismo.

Un planteamiento que se cuarteó cuando mis colaboradores y yo descubrimos células maternas en adultos que poseían un sistema inmunitario normal, incluido un individuo de 46 años. Las pruebas de que, de forma análoga, las células fetales persisten en la madre llegaron unos años antes, cuando Diana W. Bianchi, de la Universidad Tufts, descubrió ADN masculino en mujeres que habían dado a luz, decenios antes, a niños varones. (La presencia de células masculinas en mujeres suele determinarse a partir de la cantidad de ADN masculino en muestras de sangre o de tejidos procedentes de la mujer.)

¿Cómo logran sobrevivir tanto tiempo las células transferidas? La mayoría de las células viven un tiempo limitado. Las células madre constituyen una excepción: se dividen de forma indefinida y originan toda una gama de células especializadas, como las inmunitarias o las que integran el tejido de un órgano. El descubrimiento del microquimerismo a largo plazo implicaba que algunas de las células emigrantes originales correspondían a células madre o descendían de ellas. Experimentos posteriores respaldaron esa hipótesis. Las células madre (o las células que se comportan como células madre) transferidas vendrían a ser semillas esparcidas por el organismo que, en última instancia, arraigan y se integran en el paisaje.

Mi madre y yo

La presencia de células maternas en la progenie —microquimerismo materno— constituye, a buen seguro, un arma de doble filo: perjudicial en unos casos y beneficiosa en otros. En su faceta negativa, las células maternas pueden contribuir a enfermedades autoinmunitarias, aquellas en las que el sistema inmunitario despliega su arsenal contra los propios tejidos del organismo. Células procedentes de la madre parecen estar involucradas, por ejemplo, en la dermatomiositis juvenil, un trastorno autoinmunitario que afecta a la piel y a los músculos. Un trabajo publicado en 2004 por Ann M. Reed, de la Clínica Mayo, demostró que las células inmunitarias maternas, aisladas a partir de la sangre de los pacientes, reaccionaban contra otras células de esos mismos pacientes. Reed y sus colaboradores sugieren que la enfermedad quizá surge cuando las células inmunitarias maternas transferidas atacan a los tejidos del hijo.

El microquimerismo materno parece contribuir también, aunque de forma distinta, al lupus neonatal. Se cree que ese síndrome se debe, en parte, a la actividad destructiva de determinados anticuerpos que viajan desde el sistema circulatorio materno hasta el feto en gestación. Parece que esos anticuerpos atacan al tejido fetal; con ello, ponen al recién nacido en riesgo de sufrir toda una serie de trastornos, siendo el más grave de todos una inflamación del corazón, que puede resultar letal.

Aunque las madres de los niños afectados presentan el anticuerpo causante de la enfermedad en su sistema circulatorio, ellas están, por lo general, sanas; los bebés nacidos posteriormente de la misma mujer no suelen estar afectados. Ese patrón hereditario nos llevó a sospechar que, aunque los anticuerpos revisten importancia para la enfermedad, no lo son todo. De hecho, cuando Anne M. Stevens, de nuestro equipo, examinó el tejido cardiaco de niños varones con lupus neonatal que habían fallecido a causa de un fallo cardiaco, descubrió que contenía células femeninas que, presumiblemente, procedían de la madre. Esas células no estaban presentes, o eran muy escasas, en fetos que murieron por otras causas. Más del 80 por ciento de esas células maternas producían proteínas, lo que indicaba que no se trataba de células sanguíneas circulantes, sino que formaban parte del músculo cardiaco.

Esas observaciones, publicadas en 2003, implicaban que en el lupus neonatal, el ataque inmunitario se dirigía contra las células del músculo cardiaco procedentes de la madre e instaladas en el feto. Los hallazgos demostraron también que las células transferidas de la madre al feto correspondían a células madre (o a células que se comportan como células madre) porque, en apariencia, las células halladas en los hijos afectados se habían diferenciado y formaban parte del corazón. Además, esos resultados se suman a otros descubrimientos que indican que algunas enfermedades consideradas autoinmunitarias podrían surgir cuando el sistema inmunitario del huésped no reacciona contra los propios tejidos,

2. EN LA MITOLOGIA, la quimera combinaba partes de animales distintos: un león, una cabra y una serpiente. Cuando una persona alberga células de otra se dice que es microquimérica, pues el número de células foráneas es muy limitado.

BRIDGEMAN ART LIBRARY/GETTY IMAGES

sino contra las células adquiridas que se han integrado en esos tejidos.

Sin embargo, otro trabajo revela que, en algunos casos, esas células integradas podrían no incitar un ataque inmunitario, sino facilitar la reparación de órganos dañados. En 2002, comenzamos a investigar si el microquimerismo materno intervenía en la diabetes de tipo 1 (dependiente de la insulina). Esa enfermedad autoinmunitaria, que ataca sobre todo a niños y jóvenes, elimina las células beta del páncreas, productoras de insulina. Durante el embarazo, propusimos, ciertas células maternas se integraban en el páncreas del feto, se diferenciaban en células beta y, andando el tiempo, se convertían en el objetivo de un ataque inmunitario.

No nos faltaba razón, pero sólo a medias. El microquimerismo materno se hallaba con mayor frecuencia e intensidad en la sangre de diabéticos de tipo 1 que en la de sus hermanos no afectados o en la de individuos sanos con los que no guardaban parentesco. Y encontramos células maternas productoras de insulina en un páncreas procedente de la autopsia de un diabético.

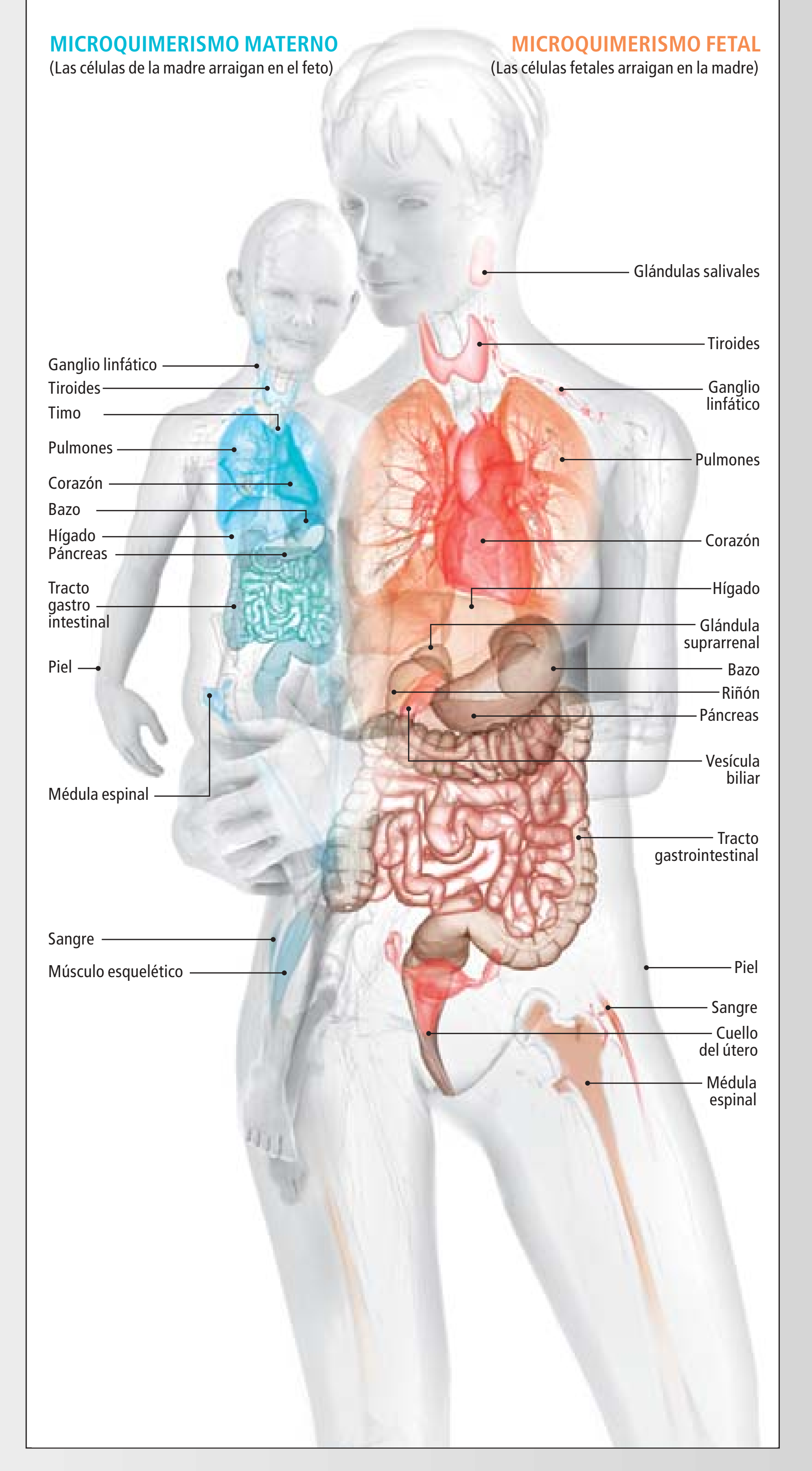
Mas descubrimos también células maternas productoras de insulina en páncreas de personas no diabéticas; y no observamos ninguna prueba de que esas células fuesen objeto de un ataque inmunitario en diabéticos. Todo lo contrario, nuestros resultados respaldan la hipótesis de que las células maternas del páncreas de los diabéticos participan en la regeneración del órgano enfermo. De tal descubrimiento, publicado en 2007, se desprendía la posibilidad de sacarle partido a la función terapéutica del microquimerismo, siempre que se encontrase una forma de inducir a las células no nativas para que se multiplicasen y se diferenciaran con el fin de restaurar los tejidos dañados.

Pros y contras del embarazo

Lo mismo que el microquimerismo materno, el microquimerismo fetal (la presencia de células fetales en la madre) parece operar como un arma de doble filo. Descubrí el lado "oscuro" del mismo a mediados de los noventa. En 1994, antes de que mi equipo hallara el microquimerismo materno a largo plazo en individuos sanos, me llamó la atención un suceso que relató Jeff Hall, experto en diagnóstico prenatal que trabajaba en Cell Pro (entonces en Seattle): habían encontrado células fetales en la sangre de una experta en técnicas de laboratorio, un año después del nacimiento de su hijo. Ello hizo que me planteara cuáles serían las consecuencias de alojar indefinidamente células de tu propio hijo. Quizás

¿DONDE SE ALOJAN LAS CELULAS?

Se ha encontrado microquimerismo en numerosos tejidos humanos, incluidos los que aparecen en la lista inferior. Se detecta a partir de la presencia de células femeninas en un varón (microquimerismo materno) o células masculinas en una mujer (microquimerismo fetal). Se detecta también mediante análisis del ADN. La presencia de cromosomas Y en una mujer significa que ha adquirido las células de un varón; lo más probable es que procedan de su hijo y que se hayan transferido durante el embarazo.



BRYAN CHRISTIE DESIGN; FUENTE: ANNE M. STEVENS *Centro Fred Hutchinson de Investigaciones Oncológicas*

algunas de las enfermedades consideradas autoinmunitarias podrían implicar una interacción entre las células propias de la madre y las adquiridas de su feto.

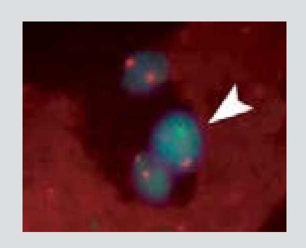
La idea era demasiado excitante como para no compartirla. En un artículo de 1996 recogí un cúmulo de observaciones procedentes de diversas áreas de la medicina, que me llevaron a cuestionar el concepto de enfermedad autoinmunitaria. En primer lugar, la mayoría de esos trastornos afectan más a las mujeres que a los varones; suelen atacar a mujeres de entre 40 y 60 años, después de que muchas de ellas hayan estado embarazadas y, con frecuencia, pasado el tiempo en que se puede culpar a las alteraciones hormonales. Si las células de larga duración procedentes del feto intervienen en los trastornos autoinmunitarios, sería de esperar que éstos apareciesen con mayor frecuencia en mujeres y en las que ya han superado uno o más embarazos.

Una segunda línea de razonamiento procede del campo de los trasplantes. Los cirujanos que realizan trasplantes suelen buscar la compatibilidad genética entre donante y receptor, es decir, procuran elegir un donante cuyos antígenos leucocitarios humanos o HLA (moléculas de la superficie celular) sean muy parecidos o idénticos a los del receptor. Si los HLA del donante presentan diferencias notables con los del receptor, el sistema inmunitario de éste rechazará el trasplante y lo destruirá como si se tratara de un agente patógeno. Si las células del donante que no es perfectamente compatible logran sobrevivir, el trasplante desencadena la enfermedad injerto-contra-huésped: las células inmunitarias del órgano donado atacan al tejido del receptor. La reacción provoca un endurecimiento de la piel, la destrucción del revestimiento del intestino y, en última instancia, daños en los pulmones.

Esa constelación de síntomas guarda estrecha semejanza con los que provoca el escleroderma, un trastorno considerado autoinmunitario. Ante semejante parecido, pensé que, en la madre, las células fetales podrían formar parte del proceso que conduce al escleroderma en mujeres. Propuse a Bianchi una colaboración para comprobar tal hipótesis. Decidimos centrarnos en madres de varones, pues resulta más sencillo demostrar la existencia de unas pocas células masculinas en medio de un océano de células femeninas: extraeríamos sangre o muestras de tejidos de mujeres con escleroderma y de mujeres sanas. Para buscar luego el ADN del cromosoma Y.

Por vez primera se abordaba la relación del microquimerismo con una enfermedad autoinmunitaria. Recogimos pruebas de la implicación, en el escleroderma, de las células fetales adquiridas por la madre. En conjunto, el nivel de microquimerismo fetal en la sangre era mayor en las mujeres enfermas que en las sanas. En otros estudios, nuestros equipos —y, de forma independiente, el de Sergio A. Jiménez, de la Universidad Jefferson—, descubrieron microquimerismo fetal en la piel y en otros tejidos afectados por la enfermedad.

3. EL HALLAZGO DE UNA CELULA MASCULINA en el hígado de una mujer demuestra la transferencia de células desde el feto hacia la madre. La célula se identificó por la presencia de un cromosoma Y (*punto verde*) y un cromosoma X (*punto rojo*) en el núcleo celular (*azul*). Las células que pertenecen a la madre contienen dos cromosomas X.



ANNE M. STEVENS *Centro Fred Hutchinson de Investigaciones Oncológicas (micrografía de hígado)*

RELACION CON ENFERMEDADES

El microquimerismo es más frecuente o pronunciado en las personas que padecen determinadas enfermedades (las de la lista inferior) que en individuos sanos. En ocasiones, las células transferidas parecen contribuir a la enfermedad; otras veces, pueden combatirla o ser resultado de ella. Se ha sugerido que las células maternas atacan a los tejidos de quienes padecen dermatomiositis juvenil, son el objetivo del ataque inmunitario en el caso del lupus neonatal y facilitan la reparación tisular en diabéticos de tipo 1. Pero seguimos sin conocer la función que tales células desempeñan en ciertas enfermedades.

Se ha hallado microquimerismo materno en:

- Atresia biliar (trastorno hepático fetal)
- Dermatomiositis juvenil (ataque inmunitario sobre la piel y los músculos)
- Lupus neonatal (ataque inmunitario sobre varios tejidos del feto)
- Escleroderma (ataque inmunitario que endurece la piel y daña otros tejidos)
- Diabetes de tipo 1, dependiente de insulina (ataque inmunitario sobre el páncreas)
- Pitiriasis liquenoide (enfermedad que produce la inflamación de la piel)

Se ha hallado microquimerismo fetal en:

- Cáncer de mama
- Cáncer de cuello del útero
- Esclerosis múltiple (ataque inmunitario sobre las neuronas del sistema nervioso central)
- Preeclampsia (hipertensión provocada por el embarazo)
- Erupción polimorfa del embarazo (inflamación de la piel)
- Artritis reumatoide (ataque inmunitario sobre las articulaciones)
- Escleroderma
- Lupus eritematoso sistémico (ataque inmunitario sobre diversos órganos)
- Enfermedades del tiroides (enfermedad de Hashimoto, enfermedad de Graves y otras)

A ello sumamos el hallazgo de otro fenómeno de interés, relacionado con los HLA de clase II, un subgrupo de HLA. En mujeres con escleroderma, los HLA II de células fetales tienden a mostrar especial semejanza con los HLA de clase II de la madre. (Dado que un feto hereda la mitad de los genes del padre, la mitad de los genes para HLA del niño y, por tanto, la mitad de las moléculas de HLA diferirían de las de la madre.) En nuestra opinión, la posesión de células fetales cuyos HLA difieren notablemente de los HLA de la madre no debería resultar problemático, porque el sistema inmunitario materno "vería" que esas células son foráneas y las eliminaría. Pero las células que guardan una semejanza extraordinaria con las de la madre (en cuanto a su dotación de HLA) serían perfectamente capaces de sortear la primera línea de defensa inmunitaria de la madre y pasar inadvertidas.

Los problemas surgirían después. Si el sistema inmunitario materno detectara la presencia del intruso, su pretensión de eliminarlo acarrearía daños colaterales en los propios tejidos de la madre y podría desencadenar un ataque autoinmunitario. O pudiera acontecer que las células enmascaradas alteraran los tenues equilibrios que forman parte del sistema inmunitario materno.

No sabemos todavía por qué las células fetales que el sistema inmunitario de una madre ha aceptado durante decenios desde el embarazo se convierten, de repente, en intrusas indeseables. Tampoco comprendemos que la madre tolere en un principio a las células intrusas. Abordaremos esas intrigantes cuestiones en la próxima fase de nuestras investigaciones.

Con el embarazo llega el alivio

Lo mismo que el microquimerismo materno, el microquimerismo fetal puede acarrear efectos positivos y negativos. ¿De qué formas podría resultar beneficioso? En teoría, las células inmunitarias procedentes de un bebé reaccionarían intensamente frente a los organismos patógenos que no son eliminados adecuadamente por el sistema inmunitario materno; en esas circunstancias, las células fetales podrían ayudar a reforzar la respuesta inmunitaria de la madre. También podrían reparar algunos tejidos. Y, aunque el microquimerismo fetal podría desencadenar determinados trastornos autoinmunitarios, parece que beneficia a las mujeres afectadas por al menos una enfermedad autoinmunitaria: la artritis reumatoide (inflamación crónica y, a menudo, dolorosa de las articulaciones).

Hace setenta años, Philip S. Hench observó que la artritis reumatoide mejora a menudo —y en algunos casos desaparece por comple-

JEN CHRISTIANSEN

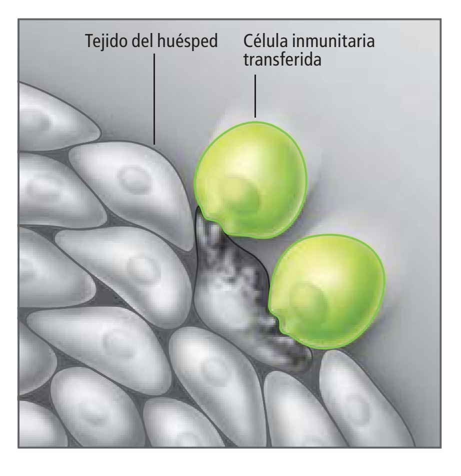
La autora

J. Lee Nelson trabaja en el Centro Fred Hutchinson de Investigaciones Oncológicas e imparte clases de medicina en la Universidad de Washington en Seattle. Trabaja en la función del microquimerismo en las enfermedades autoinmunitarias, los trasplantes, el cáncer y la reproducción.

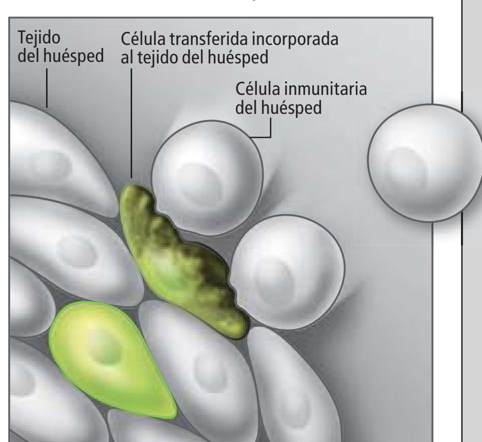
¿BUENAS O MALAS?

Estos son algunos de los efectos que se han atribuido a las células microquiméricas:

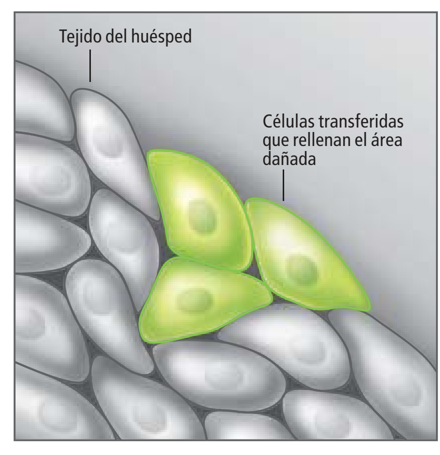
DAÑINAS: Las células inmunitarias transferidas atacan al tejido del huésped



DAÑINAS: Las células inmunitarias del huésped atacan a las células transferidas en el tejido



PROTECTORAS: Las células transferidas facilitan la regeneración del tejido del huésped que ha resultado dañado



to— durante el embarazo y reaparece luego a los pocos meses del parto. Al principio, los médicos pensaron que ello se debía a las hormonas, en concreto al cortisol, cuya concentración se duplica o triplica durante el embarazo. Pero esa no podía ser la única explicación, pues algunas mujeres con niveles de cortisol bajos se benefician de una remisión, mientras que otras con niveles de cortisol elevados, no.

Puesto que el embarazo supone un desafío para el sistema inmunitario —después de todo, el feto es semiextraño, en términos genéticos—, buscamos una explicación inmunológica para la remisión y posterior reaparición de la enfermedad. En 1993 habíamos descubierto que la mejora de la artritis reumatoide durante el embarazo se producía con mayor probabilidad cuando los HLA II del feto eran muy distintos de los maternos. Ello sugería que una desigualdad entre los HLA de clase II de la madre y del niño explicaría la mejora observada durante el embarazo.

Más tarde, descubrimos que los niveles superiores de microquimerismo fetal en la sangre de la madre guardaban correlación con una mayor atenuación de los síntomas de la artritis reumatoide durante el embarazo; asimismo, los niveles extremadamente bajos se correlacionaban con el característico brote de artritis subsecuente al parto. Se desconoce todavía por qué un mayor microquimerismo fetal o una mayor disparidad en los HLA II provocarían una mejora más evidente de la artritis reumatoide en mujeres embarazadas.

PREGUNTAS HABITUALES SOBRE EL MICROQUIMERISMO

¿Somos todos microquiméricos?
Probablemente todos nosotros albergamos algunas células de procedencia materna. Cuando tomamos una muestra de sangre de individuos sanos y analizamos el equivalente a 100.000 células descubrimos microquimerismo materno en alrededor del 20 por ciento de los sujetos. Pero esa muestra corresponde a una fracción sanguínea minúscula, que no incluye las células que se hallarían en otros tejidos. (El análisis de esas células en humanos, aunque posible, resultaría muy laborioso).

¿Cuántas células del cuerpo proceden de nuestra madre (o de nuestros hijos)?
En el sistema circulatorio, el microquimerismo materno o fetal es mínimo. Cálculos basados en medidas de ADN en individuos sanos indican que, en general, menos de una de cada 10^5 o 10^6 células son foráneas. Pero esa cifra puede ser mayor en otros tejidos. En un estudio, obtuvimos una serie de muestras de tejido de una mujer que falleció de escleroderma. En su caso, las cifras variaban en función del órgano y del tipo de célula: en un ganglio linfático se hallaron unas 190 células maternas y 105 células fetales por cada millón de células propias; en los pulmones, alrededor de 760 células maternas y 3750 células fetales por cada millón de células propias.

Además de la transmisión bidireccional entre la madre y el feto, ¿existen otros procesos naturales que produzcan microquimerismo?
Se produce un intercambio de células entre gemelos en el útero (fenómeno que se descubrió en vacas). Dado que algunos gemelos se pierden antes de ser detectados por el ginecólogo, el microquimerismo podría proceder de un gemelo "desaparecido". Aunque no se ha demostrado todavía, el microquimerismo podría adquirirse también de un hermano mayor: el hijo mayor, siendo todavía un feto, pasaría a la madre algunas células; ésta las pasaría a un segundo hijo en un embarazo posterior. No se sabe si puede producirse microquimerismo por medio de relaciones sexuales. Existen pruebas indirectas de que durante la lactancia pasan al bebé células maternas.

¿Se produce microquimerismo durante la donación de sangre o el trasplante de órganos?
Sí. Cuando se debe a intervenciones médicas, el fenómeno se denomina microquimerismo iatrogénico. La sangre donada suele irradiarse antes de suministrarla al receptor, para prevenir la reacción del injerto contra el huésped. Sin embargo, estudios realizados en pacientes que han sufrido lesiones traumáticas demuestran que algunos de los pacientes que han recibido múltiples transfusiones de sangre sin irradiar retienen, años más tarde, células del donante. De forma análoga, los receptores de órganos pueden acoger y retener células del donante; por supuesto, los receptores de células hematopoyéticas (médula espinal) se vuelven quiméricos.

Si las células foráneas se alojan y viven en los tejidos, ¿por qué no ocupan la totalidad del tejido?
La proliferación descontrolada del microquimerismo constituiría un desastre biológico. Aunque esa cuestión sigue todavía abierta, se cree que los HLA —moléculas de la superficie celular que deben ser compatibles entre donantes y receptores en un trasplante— desempeñan una función crucial a la hora de mantener bajo control la proliferación celular.

Si las células adoptadas alojan moléculas HLA distintas de las del huésped, ¿por qué no son reconocidas y eliminadas por el sistema inmunitario?
Puede que las células enmascaren sus moléculas HLA o "enseñen" al sistema inmunitario del huésped a tolerarlas, a pesar de las diferencias. Pero eso no son más que especulaciones. Cuando ahondemos en esa cuestión, quizá descubramos por qué los fetos, que son genéticamente distintos de la madre, no son eliminados por el organismo materno. Curiosamente, los datos sugieren que una gran semejanza entre los HLA de la madre y los del hijo resulta perjudicial para el embarazo; los fetos que abortan presentan con frecuencia mayor número de HLA exactamente iguales a los maternos que aquellos cuyo embarazo llega a buen término. Si bien no lo comprendemos todavía, el fenómeno tiene sentido desde el punto de vista evolutivo: la variabilidad de HLA promovería la diversidad genética de una población. Esa diversidad resulta ventajosa porque incrementa la probabilidad de que al menos algunos miembros del grupo presenten rasgos que les permitan sobrevivir ante un cambio repentino de las condiciones.

BARBARA PENOYAR *Getty Images*

¿Y AHORA QUE?

Aparte de seguir investigando las enfermedades relacionadas con el sistema inmunitario, estamos empezando a explorar las funciones —beneficiosas y lesivas— que podría desempeñar el microquimerismo en el cáncer, la reproducción y el desarrollo cerebral. Algunas de nuestras cuestiones son:

- Los resultados preliminares sugieren que las células fetales que persisten en la madre contribuirían a la disminución del riesgo de cáncer de mama que experimentan las mujeres que han dado a luz. ¿De qué modo?
- Parece razonable esperar que las células maternas que albergamos (por supuesto, más viejas que nosotros) sean propensas a convertirse en malignas. De no acontecer tal, el descubrimiento de los mecanismos que las protegen frente a esa adversidad sugeriría nuevas formas de prevenir el cáncer.
- La reproducción humana presenta una tasa de error elevada; los abortos son frecuentes. ¿Ejercen alguna influencia las células que las mujeres adultas conservan de su madre sobre el destino final de sus embarazos? En otras palabras, cuando se trata de los nietos, ¿ejerce la abuela materna alguna influencia?
- ¿Pueden las células adquiridas de una madre o de un feto superar la barrera hemoencefálica y abrirse camino hasta el cerebro y la médula espinal? De ser así, ¿influyen las células maternas en el desarrollo cerebral?

Hasta la fecha, se ha detectado microquimerismo fetal en el tiroides, los intestinos y el hígado de madres con diversos trastornos. Algunas de las células mostraban características de los tejidos en donde residían. Se ha confirmado también el microquimerismo fetal en las células inmunitarias circulantes de las madres. Que esas células resulten beneficiosas o perjudiciales podría depender de las circunstancias y del individuo.

Una nueva visión de "lo propio"

Globalmente, por tanto, parece que el microquimerismo afecta al organismo de varias formas. Por ejemplo, las células inmunitarias transferidas organizarían un ataque sobre los tejidos del organismo, como ocurre en la dermatomiositis juvenil. O las células adoptadas que se han diferenciado en los tejidos suscitarían un ataque por parte del sistema inmunitario del huésped, según ocurre en el escleroderma y en el lupus neonatal. Cabe, además, que las células intrusas operen a la manera de una brigada de socorro, desplazándose hasta los tejidos dañados para favorecer la regeneración y el restablecimiento de la función, como parece que ocurre en la diabetes de tipo 1.

Cada escenario sugiere nuevas estrategias terapéuticas. Si las células adquiridas son atacantes, se seleccionarían para eliminarlas o inhibirlas. Si son las dianas de un ataque, se desarrollarían estrategias que indujeran su tolerancia por el sistema inmunitario. Y si contribuyen a la regeneración de los tejidos dañados, se las estimularía para aliviar enfermedades en las que subyace una degradación tisular.

Aunque sólo las mujeres están sujetas al microquimerismo fetal, cualquiera puede albergar células procedentes de la madre, incluidos los hombres, los niños y las mujeres que nunca han estado embarazadas. Puesto que el microquimerismo materno se establece durante el desarrollo fetal (cuando se está formando el sistema inmunitario) y el microquimerismo fetal ocurre cuando el sistema inmunitario de la madre está maduro, uno y otro proceso podrían contribuir a "lo propio" de forma distinta. Sabemos muy poco sobre la naturaleza de esa diferencia. También está por aclarar si las mujeres se enfrentan a consecuencias excepcionales por el hecho de albergar células de generaciones distintas, las que proceden de su propia madre y las que proceden de uno o más de sus hijos.

El descubrimiento de células maternas en la progenie adulta y de células fetales en mujeres que han estado embarazadas convierte al microquimerismo en un nuevo centro de interés biológico. También desafía el concepto tradicional de "lo propio" en inmunología. Los hallazgos respaldan una nueva definición basada en el microquimerismo, adquirido de forma natural, que probablemente nos acompaña durante toda la vida, desde los primeros momentos hasta bien entrada la etapa adulta.

Resultan sugerentes los descubrimientos recientes sobre microquimerismo materno y fetal en el cerebro del ratón. Plantean toda una serie de cuestiones fascinantes: ¿afectan las células maternas al desarrollo cerebral? ¿Podría aprovecharse el microquimerismo fetal para el tratamiento de enfermedades neurodegenerativas? Y, si nuestro cerebro no es del todo "nuestro", ¿qué es lo que constituye el "yo" fisiológico?

Bibliografía complementaria

HUMAN NATURAL CHIMERISM: AN ACQUIRED CHARACTER OR A VESTIGE OF EVOLUTION? Baruch Rinkevich en *Human Immunology*, vol. 62, n.º 6, págs. 651-657; junio de 2001.

MICROCHIMERISM: AN INVESTIGATIVE FRONTIER IN AUTOIMMUNITY AND TRANSPLANTATION. Kristina M. Adams y J. Lee Nelson en *Journal of the American Medical Association*, vol. 291, n.º 9, págs. 1127-1131; 3 de marzo de 2004.

MATERNAL MICROCHIMERISM IN PERIPHERAL BLOOD IN TYPE 1 DIABETES AND PANCREATIC ISLET B CELL MICROCHIMERISM. J. Lee Nelson y col. en *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, vol. 104, N n.º 5, págs. 1637-1642; 30 de enero de 2007.





Orígenes de la diversidad biológica

Los fósiles descubiertos en China revelan que la fauna de los océanos de principios del Cámbrico, hace 530 millones de años, guardaba una estrecha semejanza con la de los océanos actuales

Jean Vannier

CONCEPTOS BASICOS

- Hace alrededor de quinientos millones de años, las especies marinas experimentaron una diversificación sin precedentes. Se produjo la "explosión del Cámbrico".
- En Chengjiang y Kaili, en el sur de China, se han hallado yacimientos cámbricos que destacan por la calidad y la diversidad de sus fósiles.
- Los fósiles han revelado un ecosistema primitivo de estructura compleja, caracterizado por la ocupación de una multitud de nichos ecológicos y el desarrollo de la depredación.
- La complejificación de las interacciones tróficas, debida a la depredación, potenció en el Cámbrico la multiplicación de las formas de vida y la aparición de nuevas adaptaciones.

Hace unos quinientos millones de años, la vida experimentó cambios profundos. En apenas diez millones de años —un instante en la escala de tiempo geológico—, las especies marinas protagonizaron una diversificación sin precedentes, se multiplicaron las formas y aparecieron nuevas adaptaciones. La mayoría de los grandes tipos animales actuales (cada uno, cada *phylum*, corresponde a un plan de organización particular), incluido el de los vertebrados, hicieron entonces su aparición. A menudo nos referimos a ese acontecimiento súbito con la expresión: "explosión del Cámbrico".

Hasta los años ochenta, el conocimiento sobre la vida del Cámbrico se basaba en los datos procedentes de la fauna de Burgess Shale (del Cámbrico medio, hace unos 515 millones de años), descubierta a principios del siglo XX por Charles Walcott en las montañas de la Columbia Británica [véanse "Los animales de Burgess Shale", por Simon Conway Morris y H. B. Whittington, INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, septiembre, 1979 y "La edad de oro de la evolución animal", por Jeffrey S. Levinton, INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, enero 1993]. Hoy día, otros yacimientos descubiertos en varias partes del planeta amplían nuestros conocimientos sobre la organización de los primeros ecosistemas complejos. Según esos hallazgos, dichos ecosistemas habrían aparecido antes de lo que se creía. Entre esas localidades, las de Chengjiang (Cámbrico inferior, hace unos 530 millones de años) y Kaili (Cámbrico medio), en el sur de China, destacan por la calidad y la diversidad de sus fósiles.

A partir de los datos reunidos en los últimos años, los paleontólogos han determinado la cronología de aparición y diversificación de los tipos animales. El estudio de numerosos fósiles descubiertos en los yacimientos chinos ha proporcionado un inventario preciso de la diversidad cámbrica en el medio marino. Los fósiles han revelado un ecosistema primitivo de estructura

1. LOS FOSILES DE CHENGJIANG, en China, de 530 millones de años de antigüedad, presentan un estado de conservación excepcional. Así lo demuestran estos organismos de cuerpo blando (lobópodos, *a* y *e*, y cordados, *b*) o cuyo exoesqueleto no estaba mineralizado (artrópodos, *c* y *d*).





e

3 mm

J. VANNIER, ESPECIMENS COLLECTIONS CHEN JUNYUAN/*Pour la Science*

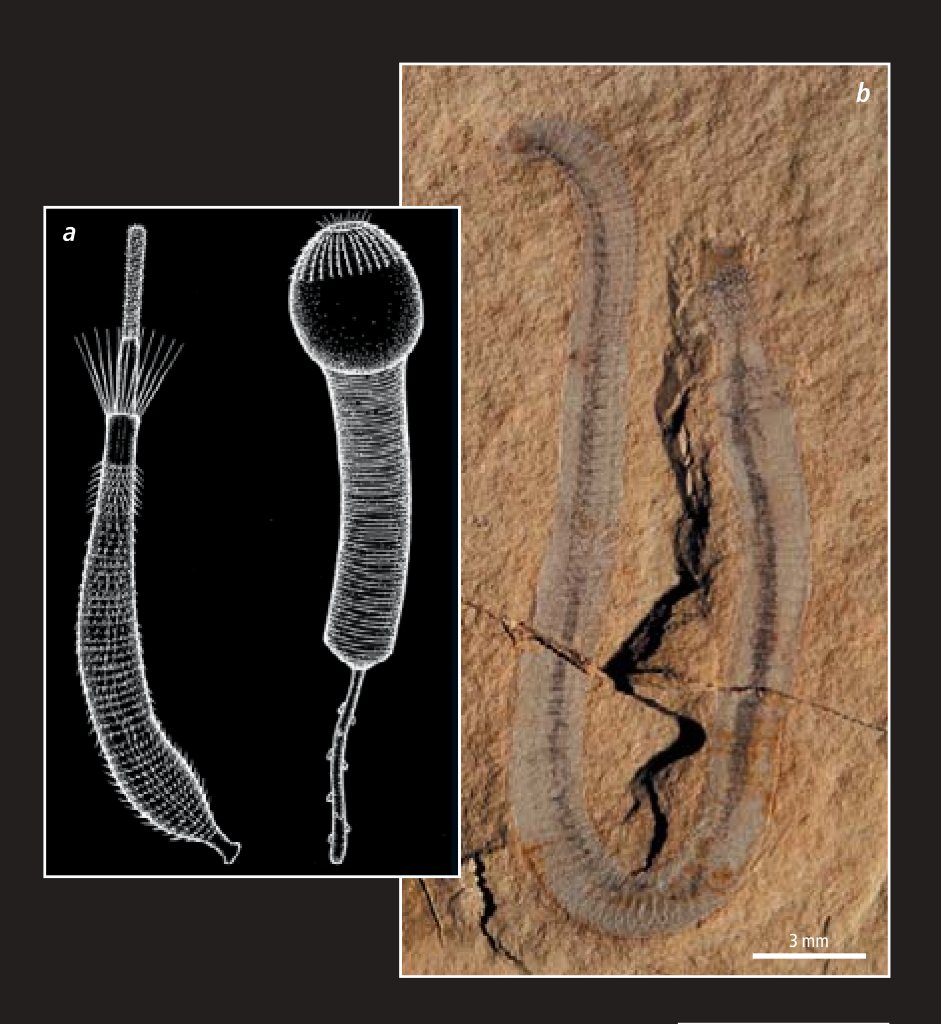
compleja, caracterizado por la ocupación de una multitud de nichos ecológicos y el desarrollo de la depredación. Esa organización basada en interacciones múltiples no tiene punto de comparación con los ecosistemas precedentes: la explosión cámbrica dio origen a un ecosistema marino cercano al ecosistema actual.

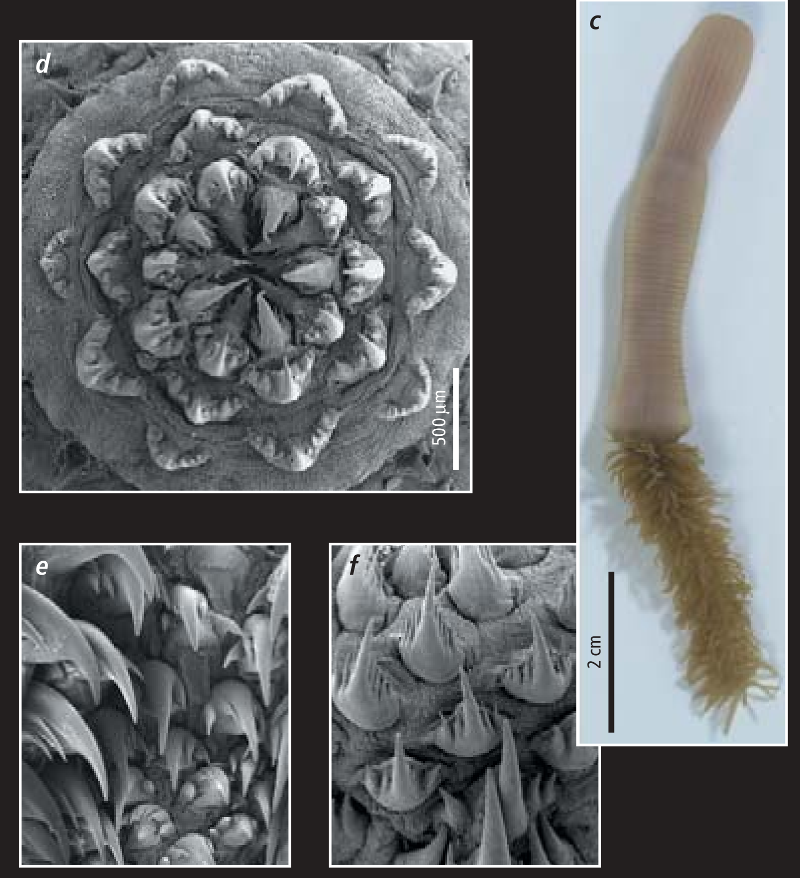
Las primeras investigaciones paleontológicas en el sudeste de China se remontan a principios del siglo XX. Varias campañas de exploración sucesivas revelaron la existencia de series cámbricas ricas en fósiles. Sin embargo, hubo que esperar a 1984 para que Hu Xiang-Guang, de la Universidad de Yunán en Kunming, desenterrara los primeros fósiles cerca de Chengjiang. Se hallaron luego, en numerosos lugares, sin salir de la provincia de Yunán, fósiles característicos de la fauna de Chengjiang, datada en 530 millones de años.

Estado de conservación excepcional

Los fósiles de Chengjiang deben su buen estado de conservación a la celeridad de su enterramiento, la finura de los sedimentos y las condiciones anaerobias del medio. Los sedimentos en cuestión constan de una sucesión de niveles de grano fino (en su origen eran fangos), en donde se conservaron los fósiles, y niveles de grano más grueso. Esos depósitos alternos resultan de tempestades sucesivas que levantaron los sedimentos del fondo y pusieron en suspensión los fangos finos que atraparon la fauna. Al quedar sepultada con tanta presteza, la fauna se libró de la acción de los necrófagos, a la vez que quedaba protegida de la destrucción mecánica provocada por el oleaje.

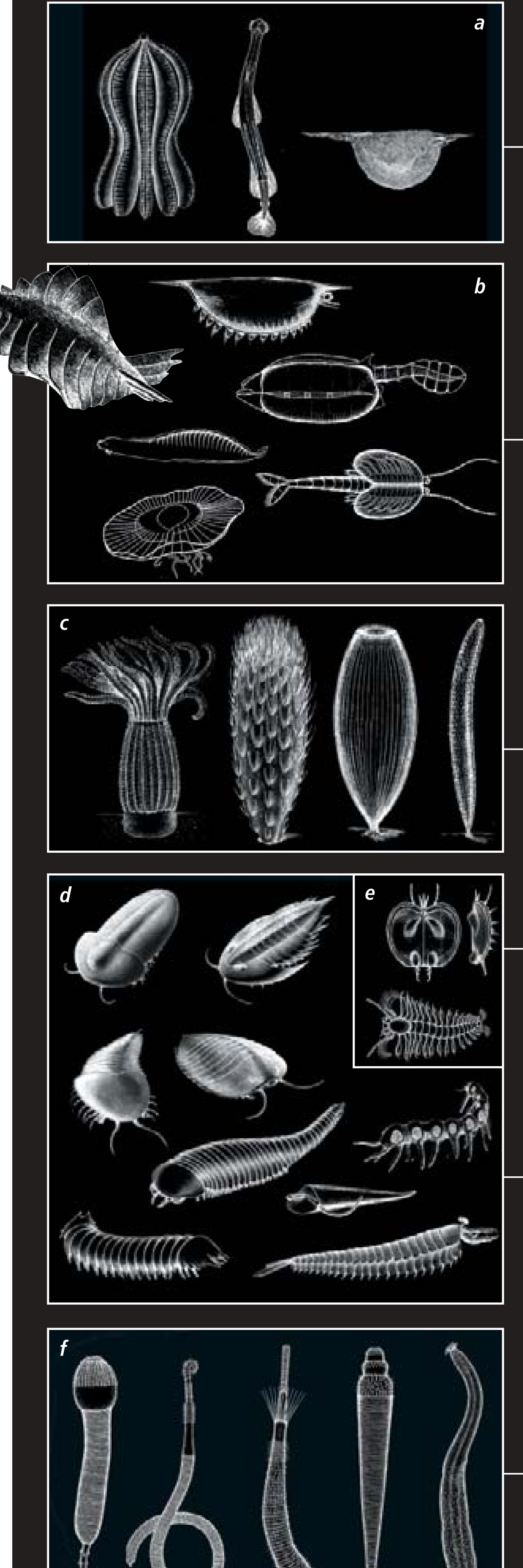
La presencia de numerosas algas fotosintéticas entre los fósiles nos habla de un mar somero en Chengjiang (algunas decenas de metros). Además, los estudios geoquímicos han demostrado aportes de agua dulce en el medio marino, lo que sugiere la cercanía de tierras emergidas. La mayoría de las improntas son pardas o rojizas, muy visibles en la superficie de un sedimento amarillento. Una fracción notable de los fósiles corresponde a gusanos, organismos de tipo medusa y animales de cuerpo blando; otros poseen un exoesqueleto sin mineralizar, artrópodos sobre todo. Su excelente estado de conservación permite estudiar sus





2. ORGANOS RELACIONADOS CON LA DEPREDACION aparecen desde el inicio del Cámbrico, prueba de la existencia de relaciones depredador-presa. Estos gusanos priapúlidos (*a* y *b*) poseían una trompa evaginable, provista de multitud de dientes, que se proyectaban para agarrar la presa. Se observa un órgano similar en especies actuales (*c*), fotografiadas aquí al microscopio electrónico (*d*, *e* y *f*).

J. VANNIER, ESPECIMENS COLLECTIONS CHEN JUNYUAN, DISEÑOS DE HUANG DIYING/*Pour la Science*



3. MAS DE 150 ESPECIES se han inventariado en Chengjiang. Ocupaban diversos nichos ecológicos: en la columna de agua (desde la superficie hasta el fondo del océano), sobre el fondo y en el interior del sedimento. Se distinguen organismos pelágicos que formaban parte del zooplancton (*a*), organismos que nadaban en la proximidad del fondo (*b*), esponjas y otros organismos fijos en el lecho (*c*) o que se desplazaban sobre la superficie del sedimento (en su mayoría artrópodos, *d*), organismos milimétricos que medraban en la interfase agua-sedimento (*e*) y animales excavadores como gusanos (*f*), que vivían en el sedimento. Su tamaño variaba de milímetros a decenas de centímetros.

DESSINS ORGANISMES D'APRES HOU ET AL. (2004, MODIFICADOS), J. VANNIER, HUANG DIYING/*Pour la Science*

estructuras internas: aparato digestivo, órganos sensoriales (ojos) y aparato respiratorio.

El segundo yacimiento, Kaili (en la provincia de Guizu), pertenece a una fecha más reciente que el de Chengjiang y es contemporáneo de Burgess Shale. Podemos, pues, comparar entre faunas que medraban en regiones geográficamente alejadas (las actuales Canadá y China) en el Cámbrico medio. En Kaili se han identificado numerosas especies: entre ellas una mayoría de trilobites y otros artrópodos, esponjas y equinodermos (los actuales lirios de mar, erizos de mar y cohombros de mar). La presencia de esos últimos indicaría un ambiente marino más profundo que el de Chengjiang (entre 150 y 200 metros).

En total, se han descrito en Chengjiang 150 especies: artrópodos (50 por ciento de la fauna local), gusanos, cordados (organismos que presentan un eje dorsal de sostén), esponjas y braquiópodos (organismos de caparazón bivalvo). Esos animales pertenecen a una veintena de tipos distintos; en su mayoría, forman parte de grupos principales del mundo marino actual. Sólo el 20 por ciento de las especies —de difícil clasificación— pertenecen a grupos extinguidos. Nos encontramos, pues, ante una fauna que ofrece un ejemplo excelente de la biodiversidad litoral a principios del Cámbrico.

Esa biodiversidad está acompañada de una sorprendente complejidad funcional, manifestada en el órgano de la visión, sistemas digestivo y respiratorio, apéndices locomotores, sistemas de captura de partículas alimenticias, órganos prensiles (en los depredadores), apéndices y órganos de flotación. Gran parte de los organismos de la fauna de Chengjiang, entre ellos numerosos artrópodos, poseían ojos pedunculados y las estructuras neurológicas asociadas, como las gambas actuales. Se han identificado también órganos de la visión en algunos vertebrados primitivos. Aunque ignoramos las

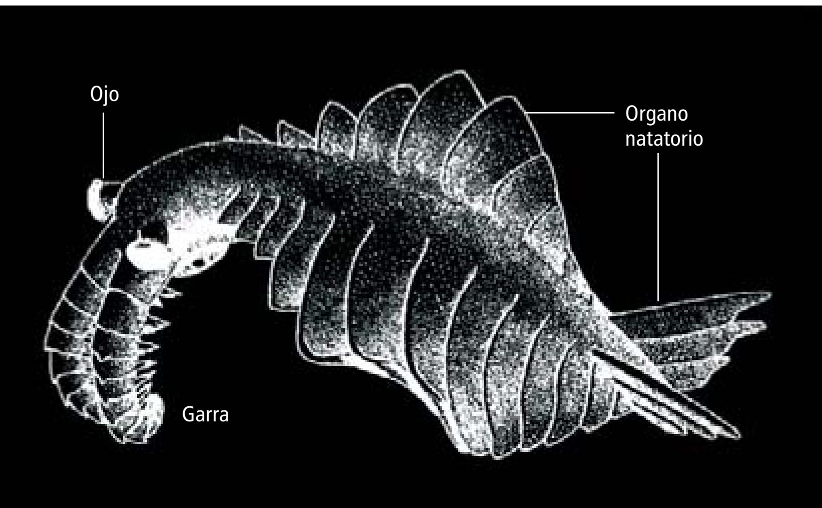
ORIGENES DE LA EXPLOSION CAMBRICA

Varios acontecimientos han trastornado el mundo vivo en el decurso de los últimos 600 millones de años. Recuérdese la gran extinción en la transición del Pérmico al Triásico (hace 250 millones de años), que vio desaparecer el 90 por ciento de las especies. O la extinción en masa del final del Cretácico, hace 65 millones de años, caracterizada por el fin de los dinosaurios. Todos los períodos de crisis presentan un denominador común: van seguidos de una reconstitución de los ecosistemas y de la aparición de especies nuevas. Los grupos supervivientes se diversifican y ocupan los nichos ecológicos que dejaron libres los grupos extinguidos. Pero la gran diversificación biológica que señala la transición Precámbrico-Cámbrico no pertenece a ese tipo de acontecimiento. ¿Cuáles fueron sus causas?

Algunos expertos apelan a un aumento de la concentración del oxígeno atmosférico y disuelto en el agua de los océanos. En efecto, los organismos del Cámbrico, algunos muy activos (los depredadores, las especies nadadoras), veían crecer sus requerimientos de oxígeno. Pero tal hipótesis carece todavía de pruebas. Andrew Knoll, de la Universidad de Harvard, ha demostrado que se llegó a la concentración necesaria de oxígeno mucho antes del Cámbrico. Algunos quieren ver la influencia de glaciaciones importantes que tuvieron lugar a finales del Precámbrico. Se conoce por hipótesis de la "Tierra bola de nieve". Y postula una glaciación sobre el conjunto del planeta, incluidos los océanos. Sin embargo, resulta difícil establecer una relación entre un escenario catastrófico y la aparición de nuevas formas de vida. Todo lo más, se puede imaginar un trastorno del ecosistema precámbrico, que habría dejado vacíos algunos nichos ecológicos. Las modificaciones de la cadena trófica (sobre todo un aumento de la producción primaria oceánica) quizás explicarían la diversificación de las estirpes animales. Según Nick Butterfield, de la Universidad de Cambridge, la aparición del zooplancton habría modificado de forma notable la cadena trófica marina. Al añadirse a otros detritos, la materia orgánica contenida en las pellas fecales del zooplancton habría constituido un recurso alimentario nuevo y abundante para los organismos que medraban sobre el fondo. Aunque no justificaría la explosión del Cámbrico, habría favorecido el desarrollo de los primeros organismos cámbricos.

En cualquier caso, la complejificación de las interacciones, debida a la depredación, potenció la diversificación biológica. Fuera cual fuere la importancia relativa de los factores ambientales, la explosión cámbrica corresponde a la última etapa de un largo proceso evolutivo, de orden genético y de desarrollo, que se venía produciendo desde el Precámbrico. También aquí la paleontología aporta pruebas de ello. Un equipo chino-norteamericano ha identificado en sedimentos precámbricos de China, de 590 millones de años de antigüedad, los primeros animales bilaterales conocidos. Son extremadamente pequeños (menos de 200 micras), pero complejos (poseen boca, faringe y órganos sensoriales).





4. *ANOMALOCARIS* era el mayor depredador de la fauna de Chengjiang. Estaba provisto de órganos de natación y, en la parte anterior, de potentes garras.

CLICHE J. VANNIER, SPECIMEN COLLECTIONS CHEN JUNYUAN, DIBUJO BASADO EN COLLINS (1996, MODIFICADO)/*Pour la Science*

capacidades de detección de tales ojos, la visión ya estaba muy desarrollada en el Cámbrico inferior. Semejante avance suponía una ventaja evidente para los animales, ya que facilitaba la detección de presas y depredadores y percatarse de variaciones en la intensidad luminosa a lo largo del día.

Más de 150 especies

Los artrópodos de Chengjiang respiraban igual que los crustáceos actuales: a través de laminillas branquiales (conservadas a menudo al nivel de las patas), que permitían la captación del oxígeno disuelto.

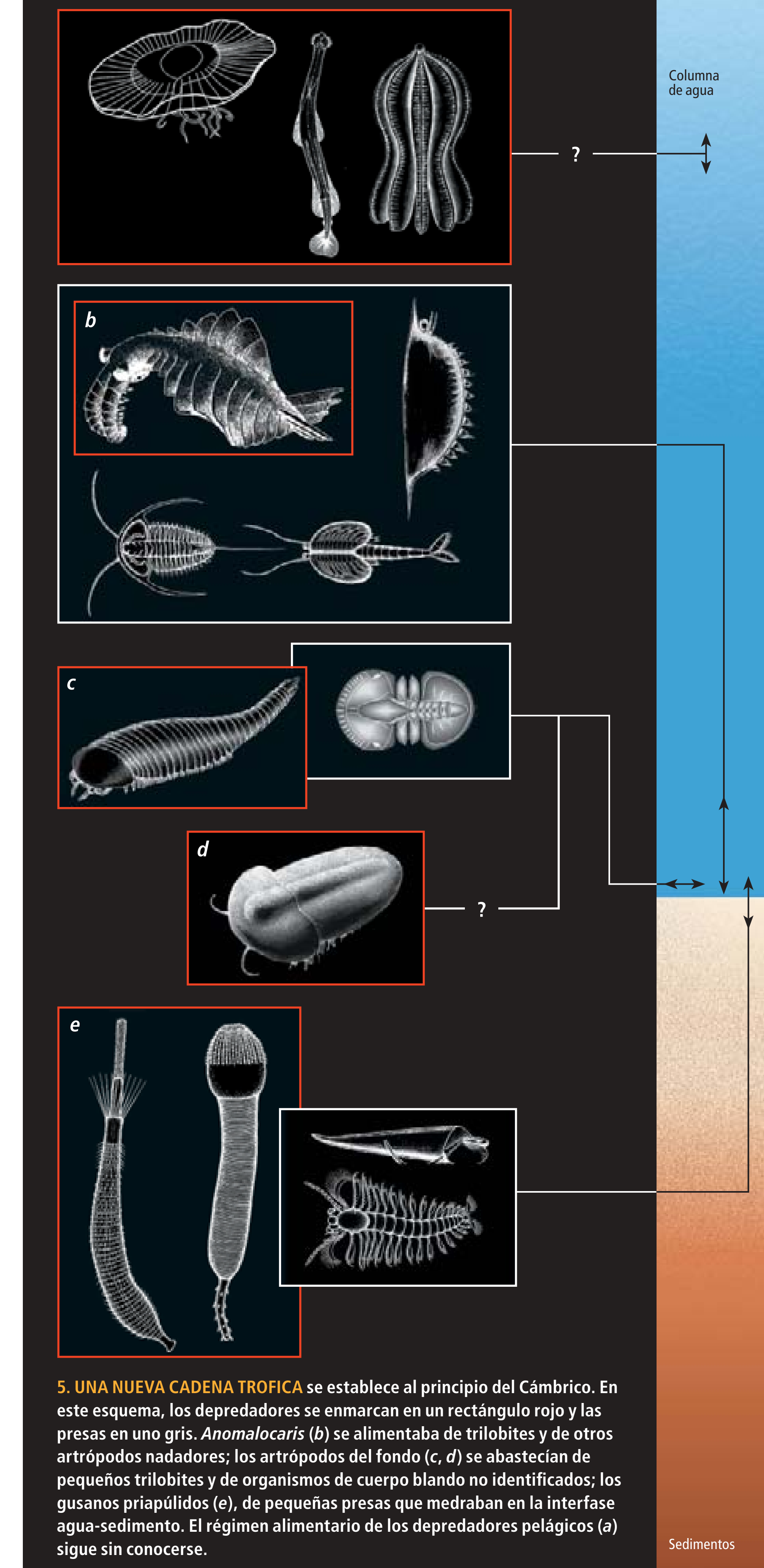
El ochenta por ciento de los tipos animales presentes en Chengjiang no aparecen en series geológicas más antiguas (Precámbrico). Observación que refuerza la hipótesis de una aceleración evolutiva en el tránsito Precámbrico-Cámbrico. En la fauna de Chengjiang se han identificado más del cincuenta por ciento de los tipos animales actuales. Entre los últimos grupos descubiertos por Chen Jun-Yuan y Huang DiYing, en Nanquín, figuran los gusanos priapúlidos y sipuncúlidos, y los quetognatos. Los tipos que faltan corresponden a grupos zoológicos actuales menores o bien a organismos minúsculos y frágiles, con pocas probabilidades de haberse preservado en estado fósil.

Añadamos que, en 1999 y 2003, Shu Degan, de la Universidad de Xi'an, descubrió en Chengjiang dos formas que guardan una estrecha semejanza con las larvas de lamprea actuales, hallazgo que nos obliga a retrotraer la fecha de aparición de los vertebrados y de nuestra propia historia evolutiva hasta el inicio del Cámbrico. De ese modo, se consolida la hipótesis de que la mayoría de los planes de organización animal actuales se encontraban ya establecidos hace quinientos millones de años.

Algunos de los animales descubiertos en Chengjiang persisten envueltos en el misterio, al carecer de referencia actual. Aludimos a organismos, pequeños y medusiformes (eldónidos), y a los vetulicólidos, interpretados a veces como cordados, pero cuya segmentación corporal recuerda la de los artrópodos. Citemos asimismo los hiolitos, animales cónicos de tamaño reducido que vivían sobre el fondo. Con todo, el océano cámbrico habría resultado familiar a un zoólogo del siglo XXI.

Primeros ecosistemas

Durante años, el inventario de la diversidad constituyó el objetivo principal de los paleontólogos; pocos de ellos se dedicaron a desentrañar el funcionamiento del ecosistema cámbrico. En el mundo marino actual, todos



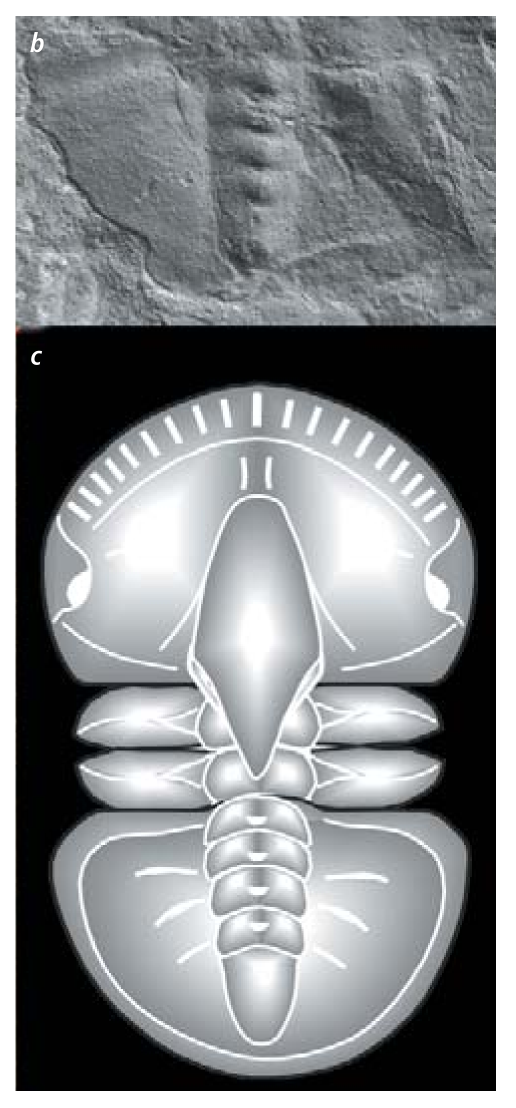
5. UNA NUEVA CADENA TROFICA se establece al principio del Cámbrico. En este esquema, los depredadores se enmarcan en un rectángulo rojo y las presas en uno gris. *Anomalocaris* (*b*) se alimentaba de trilobites y de otros artrópodos nadadores; los artrópodos del fondo (*c*, *d*) se abastecían de pequeños trilobites y de organismos de cuerpo blando no identificados; los gusanos priapúlidos (*e*), de pequeñas presas que medraban en la interfase agua-sedimento. El régimen alimentario de los depredadores pelágicos (*a*) sigue sin conocerse.

DIBUJOS DE ORGANISMOS BASADOS EN HOU ET AL. (2004, MODIFICADOS), J. VANNIER, HUANG DIYING/*Pour la Science*

El autor

Jean Vannier es director de investigación en el CNRS. Trabaja en la UMR PEPS 5125, Paleoambientes y paleobiosfera, en la Universidad Claude Bernard Lyon 1.





6. EN EL YACIMIENTO CHINO DE KAILI se conserva el tubo digestivo de un artrópodo (*a*); contiene restos de pequeños trilobites agnóstidos (*b*), como el que se muestra aquí reconstruido (*c*).

CLICHES Y RECONSTRUCCION J. VANNIER Y ZHU MAOYAN/*Pour la Science*

los nichos ecológicos están ocupados; los organismos interaccionan en el seno de cadenas alimentarias y de redes tróficas. ¿Qué ocurría al respecto a principios del Cámbrico?

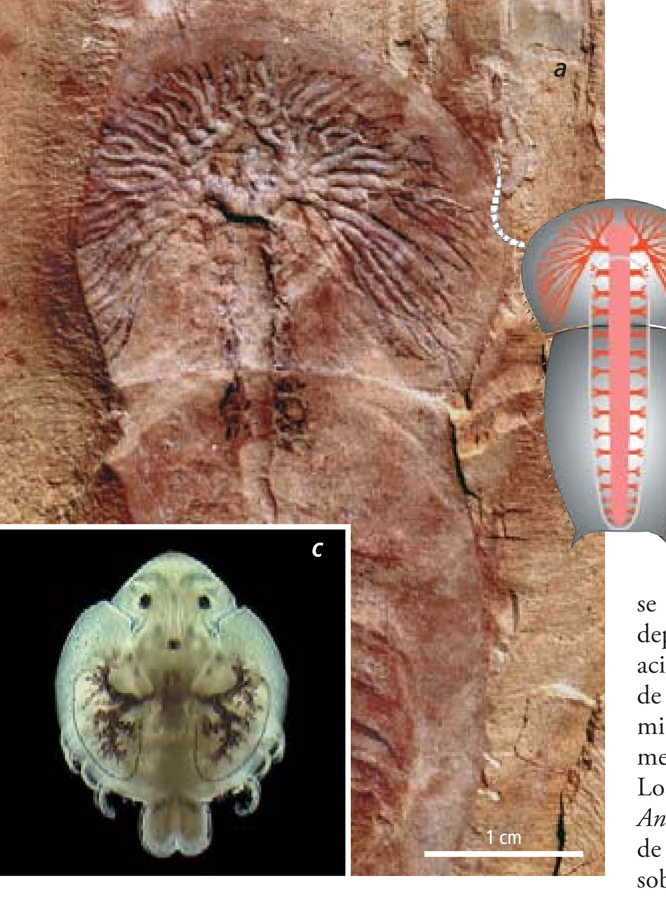
Los fósiles demuestran que multitud de organismos medraban en la superficie de los sedimentos marinos y en su inmediatez. Los bradóridos, artrópodos de tamaño milimétrico, extremadamente abundantes y protegidos por un escudo bivalvo, ocupaban un nicho ecológico parecido al de los actuales ostrácodos (bivalvos), en la interfase agua-sedimento. Por otra parte, los ostrácodos sustituyeron a los bradóridos hace 490 millones de años. Junto a ellos, otros organismos cónicos de tamaño reducido, como los hiolitos (posibles moluscos), así como trilobites muy pequeños, se repartían los nichos disponibles en la interfase agua-sedimento.

Los primeros centímetros de sedimentos estaban poblados por múltiples organismos excavadores, sobre todo, gusanos (priapúlidos, sipuncúlidos). Numerosas especies hallaban refugio y alimento en ese ambiente; se han conservado algunas de sus trazas de actividad (madrigueras, pistas).

La columna de agua estaba asimismo colonizada por numerosos organismos, de manera permanente o temporal: quetognatos, ctenóforos, formas parecidas a medusas y artrópodos bivalvos, algunos de los cuales alcanzan varios centímetros, como *Isoxys*. Dichas formas muestran adaptaciones a la natación y a la flotación, adaptaciones que se encuentran también en el plancton actual. En otros yacimientos chinos se han descubierto pequeños artrópodos bivalvos, muy parecidos a los ostrácodos pelágicos (de alta mar) actuales. Revelan la existencia de un zooplancton abundante y la colonización de ambientes marinos profundos. La aparición de un zooplancton en el Cámbrico inferior debió constituir una innovación clave, que abrió el camino a las cadenas alimentarias modernas.

Cada uno a la búsqueda de su presa

Los fósiles chinos arrojan luz sobre las relaciones depredador-presa en el seno del ecosistema cámbrico marino. En Kaili (Cámbrico medio), se ha encontrado el tubo digestivo de un artrópodo de una decena de centímetros de longitud. Contiene los restos de trilobites minúsculos que abundaban en la interfase agua-sedimento. A un lado y a otro del tubo se conservan glándulas digestivas, lo que atestigua una actividad enzimática notable en relación directa con la digestión de presas. La conservación de contenidos estomacales es extraordinariamente rara en el Cámbrico. En la fauna de Burgess hallamos



7. NUMEROSOS ORGANOS COMPLEJOS aparecieron durante el Cámbrico. Aquí, el aparato digestivo ramificado de un artrópodo (*a*, *b*). Los divertículos arborescentes servían para el almacenamiento y la digestión del alimento. Se observa un sistema parecido en el crustáceo actual *Argulus* (*c*), parásito de peces.

CLICHES Y RECONSTRUCCION J. VANNIER, SPECIMEN COLLECTIONS CHEN JUNYUAN/*Pour la Science*

otro ejemplo: el tubo digestivo de un gusano depredador, el priapúlido *Ottoia*, lleno de hiolitos alineados.

En Chengjiang se han descubierto aparatos digestivos enteros, sobre todo, en los naraoidos, parientes de los trilobites. La comparación con los crustáceos actuales arroja luz sobre su función. *Argulus*, un crustáceo parásito de peces, utiliza una red de divertículos muy parecidos, unidos al tubo digestivo, para almacenar, y digerir luego lentamente mediante enzimas, la sangre de sus presas. Se observan dispositivos arborescentes semejantes en las cacerolas de las Molucas y en algunos arácnidos. Esos dispositivos se hallan adaptados a un régimen alimentario basado en tejidos blandos o fluidos; permiten el almacenamiento de alimento. En consecuencia, se supone que los naraoidos y otros artrópodos del Cámbrico disponían de un modo de alimentación parecido.

También los órganos prensiles ofrecen indicios de comportamientos depredadores. En determinados gusanos cámbricos, hemos identificado una trompa armada de dentículos que debía de constituir un dispositivo eficaz de captura. En la Estación Marina de Kristineberg, hemos estudiado el comportamiento de los gusanos priapúlidos actuales, que descienden de formas del Cámbrico. Capturan a sus presas mediante una trompa evaginable y denticulada; se dirige lentamente la presa hacia el conducto digestivo del animal cuando la trompa se repliega (por invaginación, como si se tratara del dedo de un guante).

Otras pruebas, más indirectas, confirman la importancia de la depredación en el ecosistema cámbrico. Nos referimos a los coprolitos. En Chengjiang se han encontrado esos excrementos fósiles, depositados por los depredadores. Ovoides o acintados, contienen los restos no digeridos de presas (bradóridos, hiolitos o gambas primitivas), correspondientes a organismos que medraban sobre el fondo o en su proximidad. Los coprolitos más voluminosos son los de *Anomalocaris*, el mayor depredador conocido de la fauna del Cámbrico; se estima que podía sobrepasar el metro de longitud. Ese cazador adaptado a la natación y a la captura de presas estaba dotado, asimismo, de una serie de glándulas digestivas.

Orígenes todavía oscuros

El ecosistema marino de principios del Cámbrico, tal como nos aparece a través del estudio de los yacimientos chinos, se halla muy diversificado. Así lo indican la morfología, el modo de vida de los organismos y la variedad de nichos ecológicos ocupados. Se trataba de un sistema estructurado; presentaba estrecha semejanza con los ecosistemas marinos actuales. Basaba su funcionamiento en un entramado de interacciones complejas y múltiples, inédito, sin precedentes en los ecosistemas precámbricos. Por botón de muestra, las faunas de tipo ediacarense, conocidas en numerosas regiones del mundo de hace entre 565 y 540 millones de años, no ofrecen una complejidad biológica pareja. ¿Por qué una tal “revolución ecológica” en los albores del Cámbrico?

Los elementos de respuesta son todavía fragmentarios. Pero hay varios factores que desempeñaron, a buen seguro, un papel crucial: la diversificación de la producción primaria oceánica, las modificaciones de la red trófica (introducción del zooplancton) y de los recursos alimentarios disponibles, la presencia de numerosos nichos ecológicos vacíos y, sobre todo, la depredación, sin olvidar la cascada de estrategias y adaptaciones que la acompañan. Aunque la ecología no lo explica todo, la reorganización completa del ecosistema marino aceleró, probablemente, la evolución biológica.

Bibliografía complementaria

DIRECT EVIDENCE FOR PREDATION ON TRILOBITES IN THE CAMBRIAN. Mao-Yan Zhu, Jean Vannier, Heyo Van Tien y Yuan-Long Zhao en *Biology Letters*, vol. 271, págs. 277-280; 2004.

THE CAMBRIAN FOSSILS OF CHENGJIANG. Xian-Guang Hou, Richard J. Aldridge, Jan Bergström, David J. Siveter, Derek J. Siveter y Xiang-Hong Feng. Blackwell; China, 2004.

ON THE ORIGIN OF PHYLA. James W. Valentine. The University of Chicago Press, 2004.

SMALL BILATERIAN FOSSILS FROM 40 TO 55 MILLION YEARS BEFORE THE CAMBRIAN. Jun-Yuan Chen *et al.* en *Science*, vol. 305, págs. 218-222; 2004.

El beduino iba de negro

La ropa blanca sería menos cálida bajo un sol abrasador, pues refleja bien la luz. ¿Por qué visten entonces de negro los beduinos? Para aprovechar la convección

Jean-Michel Courty y Edouard Kierlik

¿Cómo vestirse para protegerse del sol? "De blanco", pensamos, pues sabemos que ese color absorbe poca radiación solar. Sin embargo, los nómadas del desierto visten también de negro. ¿Puede una indumentaria oscura ser tan confortable bajo el sol como otra clara? Es ésta una interesante cuestión que se aclara examinando los distintos intercambios de energía que entran en juego.

Del color de una superficie depende la cantidad de luz que refleja y, por ende, la cantidad de calor que absorbe. Cuanto más oscura es, más luz absorbe y, por ello, más energía luminosa, que se transforma en calor. Cuando está muy alto, el sol lanza sobre el suelo cerca de 1000 watt por metro cuadrado. Un objeto negro absorberá hasta el 90 por ciento de esa energía. Esa fuente de energía se aprovecha con un "panel solar", un panel ennegrecido sobre el que se haga circular agua para calentarla con poco gasto. Al revés, si se desea reducir el calentamiento solar, se emplea el blanco, pues éste refleja casi toda la luz incidente. He aquí por qué los muros de las viviendas se pintan de blanco en las regiones soleadas.

Pero el análisis dista de ser completo. Para establecer el verdadero balance energético de una prenda, hemos de tener también en cuenta de qué modo pierde energía por radiación. Todo cuerpo irradia más cuanto más caliente está. Una prenda a la temperatura del sol estival (40 ºC) emite, por ejemplo, en el infrarrojo lejano (unas 9 micras de longitud de onda). Ahora bien, los buenos absorbentes son, a su vez, óptimos emisores. El negro, muy buen absorbente, es muy buen emisor: unos 500 watt por metro cuadrado para una superficie a temperatura ambiente. Recíprocamente, el blanco, que absorbe menos, emite también mucho menos que el negro. Por ese motivo, entre otros, los osos árticos han adquirido un pelaje blanco: les interesa más conservar el calor interno, irradiando poco, que absorber la poca luz solar que les llega.

Balance energético

En detalle, las propiedades de un cuerpo con respecto a la luz visible y a la radiación infrarroja dependen no sólo de su color, sino también del material que lo constituye. Comparemos las telas blancas y negras que usan los beduinos. La energía absorbida por la chilaba negra de una persona sometida al sol del desierto es de 840 watt por metro cuadrado, mientras que sus pérdidas por radiación infrarroja son de 540 watt por metro cuadrado. La ganancia neta de



1. **La luz solar (*flechas naranja*) es devuelta por las superficies claras, mientras que es absorbida por las superficies oscuras: un muro blanco se calienta menos que un panel negro. Por otra parte, irradia menos calor (*flechas negras*) que la superficie del panel negro.**

BRUNO VACARO



2. El “ventilador beduino” refresca una tienda por convección: calentada por la radiación solar, la lona oscura de la tienda calienta a su vez el aire superior (*flechas rojas*) que se escapa por arriba aspirando así, por abajo, aire a temperatura ambiente (*flechas azules*).



3. Clara u oscura, la doble chilaba de los beduinos asegura la comodidad bajo el sol. Más alta en la chilaba negra, la temperatura de la superficie favorece la convección del aire, que libera incesantemente el calor que la radiación solar deposita en la tela o que produce el cuerpo.

BRUNO VACARO

300 watt por metro cuadrado es un tercio de la potencia absorbida. Una chilaba blanca absorbe 650 watt por metro cuadrado: lo elevado de este valor se debe a que la tela blanca absorbe tanta radiación infrarroja como la tela negra, la cual representa ella sola la mitad de la energía luminosa solar que llega al suelo. Además, un tejido blanco emite en el infrarrojo más o menos como un tejido negro: 530 watt por metro cuadrado. Al final, cada metro cuadrado de tejido blanco absorbe sólo 120 watt, o sea, casi tres veces menos que el tejido negro.

Un equipo israelí ha medido las temperaturas superficiales de dos chilabas de beduino para una temperatura de 38 ºC al sol y ha comprobado que la de la prenda clara era de 41 ºC, mientras que la de la prenda oscura era de 47 ºC.

Así, una prenda negra parece peligrosa, ya que un aumento de la temperatura corporal de más de 4 grados es fatal. Para entender por qué los nómadas del desierto, pese a todo, se visten de negro, fijémonos en sus tiendas, que son tan negras como confortables. Su confort se debe a dos efectos físicos: la sombra producida por el toldo y la ventilación de la tienda. Como absorbe mejor la radiación solar, un toldo negro da una sombra mejor que un toldo blanco del mismo grosor. Más calentada por el sol, corre sin embargo el riesgo de transmitir su calor al aire que encierra. Para evitarlo, los beduinos abren sus tiendas de par en par. El aire en contacto con el tejido negro se calienta, se dilata y, al hacerse menos denso que el aire ambiente, sube antes de abandonar el abrigo por arriba. Así aspira hacia la tienda aire exterior, que no está tan caliente, y arrastra consigo el calor que le ha transmitido el toldo. De ese modo, la superficie caliente de la tienda inicia un movimiento de convección que renueva constantemente el aire de la tienda, incluso en ausencia de brisa. El motor del “ventilador beduino” es, sin duda, el toldo negro de la tienda.

La doble chilaba de los beduinos

¿Se debe a la ventilación que los beduinos no sufran por el calor que se acumula en sus prendas negras? Sí, pero antes de explicarlo, examinemos qué es un vestido confortable bajo el sol: como una tienda que permanezca siempre a la temperatura ambiente, esa prenda hará que el cuerpo se mantenga a su temperatura de 37 ºC, cualquiera que sea la temperatura exterior. Para ello, protege al cuerpo del calor exterior y también libera el producido constantemente por el metabolismo (incluso en reposo, una persona disipa al menos 100 watt). La transpiración se encarga de ello. Para evaporarse, el sudor absorbe el calor que él mismo arrastra a la piel. Todo calentamiento adicional debe ser compensado por una transpiración más intensa. En los trópicos, en los momentos más cálidos, se llega a perder más de medio litro de agua por hora. Un vestido confortable facilita una sudoración refrescante.

Entendemos ahora por qué se elige una prenda oscura o una prenda clara. Las que se llevan cerca del cuerpo, como una camisa o un pantalón, están en contacto con la piel. Para que no se calienten demasiado, conviene que sean claras. En cambio, los beduinos visten prendas flotantes, grandes chilabas que los cubren de la cabeza a los pies para protegerlos del sol, el viento y la arena. Los hombres se ponen primero, directamente sobre la piel, un camisón de algodón. Sobre éste se colocan luego una vestidura holgada. El tejido exterior no está, pues, en contacto con la piel. El aire circula fácilmente entre ambas prendas. El aire calentado por el tejido exterior se eleva por el interior y aspira por debajo de la chilaba aire ambiente más frío. En ese movimiento de convección, todo sucede como si las dos vestiduras funcionaran como un fuelle, expulsando el aire caliente a través de la tela y por la escotadura.

En realidad, la temperatura del aire caliente que circula bajo la prenda, y también la de la piel, no dependen del color la prenda exterior: aunque la superficie de la chilaba oscura absorba más energía que la chilaba clara, el calentamiento de la superficie negra refuerza lo suficiente los efectos beneficiosos de la convección para compensar ese exceso de energía.

Incluso al sol, las leyes de la física nos permiten elegir a nuestro gusto el color de nuestra ropa.

Cifras y letras

Un programa informático resuelve, con bastante ingenio, los problemas numéricos y verbales del conocido concurso televisivo

Juan M. R. Parrondo

La mayoría de los lectores conocerán el concurso *Cifras y Letras*. En él se alternan dos pruebas, una numérica y otra de construcción de palabras. En la primera de ellas se dan seis números, que pueden ser 1, 2, 3,... 9, 10, 25, 50, 75 o 100, y un número "objetivo", que se encuentra entre 101 y 999. Con los seis primeros números hay que obtener, mediante las cuatro operaciones elementales (suma, resta, multiplicación y división), el número objetivo o acercarse a él lo máximo posible.

A pesar de la simplicidad matemática del problema, plantea algunas cuestiones interesantes. Cuando el número objetivo es grande, siempre me hago la siguiente pregunta: "¿Cuál es el número máximo que puede obtenerse a partir de los seis números iniciales?" La respuesta no es difícil. Entre dos números cualesquiera, la multiplicación es la operación que da mayores resultados, excepto si uno de los números es 1, en cuyo caso es mejor sumar. La estrategia idónea para conseguir el mayor número posible es entonces multiplicar los seis números iniciales entre sí, si ninguno de ellos es 1. Si ocurre esto último, ¿cómo deberíamos sumar el 1 para maximizar el resultado? Como $(a + 1) \times b = a \times b + b$, habrá que conseguir que b sea lo más alto posible. Por tanto, la estrategia óptima consiste en sumar el 1 al menor de los números iniciales y multiplicar el resultado por los cuatro números restantes. Por ejemplo, el mayor número que se puede conseguir con 1, 3, 2, 10, 5 y 8 es $10 \times 8 \times 5 \times 3 \times (2 + 1) = 3600$.

Pero volvamos al problema original del concurso: conseguir el número objetivo a partir de los seis números dados. Pedro Reina, profesor de matemáticas, ha diseñado un programa capaz de resolver el problema en menos de un segundo, es decir, capaz de encontrar la combinación de operaciones que más se acerca al número objetivo. Podemos estar seguros de que se trata de la mejor combinación, porque el algoritmo que utiliza el programa es una búsqueda exhaustiva a través de todas las posibles combinaciones. El método para codificar y explorar estas combinaciones, de notable ingenio, ilustra una de las estrategias típicas de la inteligencia artificial: la búsqueda en árboles de decisiones.



RADIO Y TELEVISION DE ANDALUCIA *RTVA*

Reina ha conseguido organizar todas las posibles combinaciones en un árbol que se crea a partir de una serie de decisiones, tal y como se muestra en la ilustración. Cada decisión consiste en elegir dos números y una operación a realizar entre ambos. No hay ninguna ambigüedad con respecto al orden en el que realizar la operación, puesto que la suma y la multiplicación son conmutativas y la resta y división sólo pueden dar un número entero y positivo con un orden dado. De hecho, para muchos pares de números, la división no puede realizarse de modo que el resultado sea un número entero, en cuyo caso dicha operación queda excluida.

En el primer ejemplo de la ilustración, hemos tomado el 10 y el 7 y los hemos multiplicado. Eliminamos de la lista los dos números seleccionados, el 10 y el 7, y añadimos el resultado de la operación, en este caso 70. Por tanto, tras cada paso, tenemos una serie de números más reducida. Después de cinco pasos el resultado es un único número. El algoritmo de Reina explora todas estas posibles decisiones hasta encontrar el número objetivo en cualquiera de los pasos dados. Por ejemplo, en el segundo caso mostrado en la ilustración, el número objetivo, 288, se ha encontrado en el cuarto paso, por lo que no es necesario continuar. El algoritmo almacena el número que más se ha acercado al objetivo a lo largo de la exploración; por tanto, si en la búsqueda no se encuentra finalmente el número exacto, el programa da como solución la aproximación más cercana.

¿Es posible esta exploración exhaustiva en un tiempo razonable? Para responder a esta pregunta, calculemos primero el tamaño del árbol de combinaciones. En el primer paso podemos elegir $(6 \times 5)/2 = 15$ parejas de números y aplicarles 4 operaciones. Suponiendo que la división es siempre aplicable, el número de opciones en el primer paso es $4 \times (6 \times 5)/2 = 60$. En general, si disponemos de n números, las posibles opciones son:

$$4 \times n(n-1)/2 = 2n(n-1)$$

Por tanto, el número total de opciones en los cinco pasos es:

$$2^5 \times 6 \times (5 \times 4 \times 3 \times 2)^2 = 2.764.800$$

es decir, algo menos de 3 millones de posibilidades. Si descartamos la división, el resultado sería:

$$(3/2)^5 \times 6 \times (5 \times 4 \times 3 \times 2)^2 = 656.100$$

ligeramente superior al medio millón de posibilidades. La cifra final debe, pues, hallarse entre estas dos cantidades. En cualquier caso, se trata de un número asequible para que un ordenador moderno realice la exploración exhaustiva en segundos.

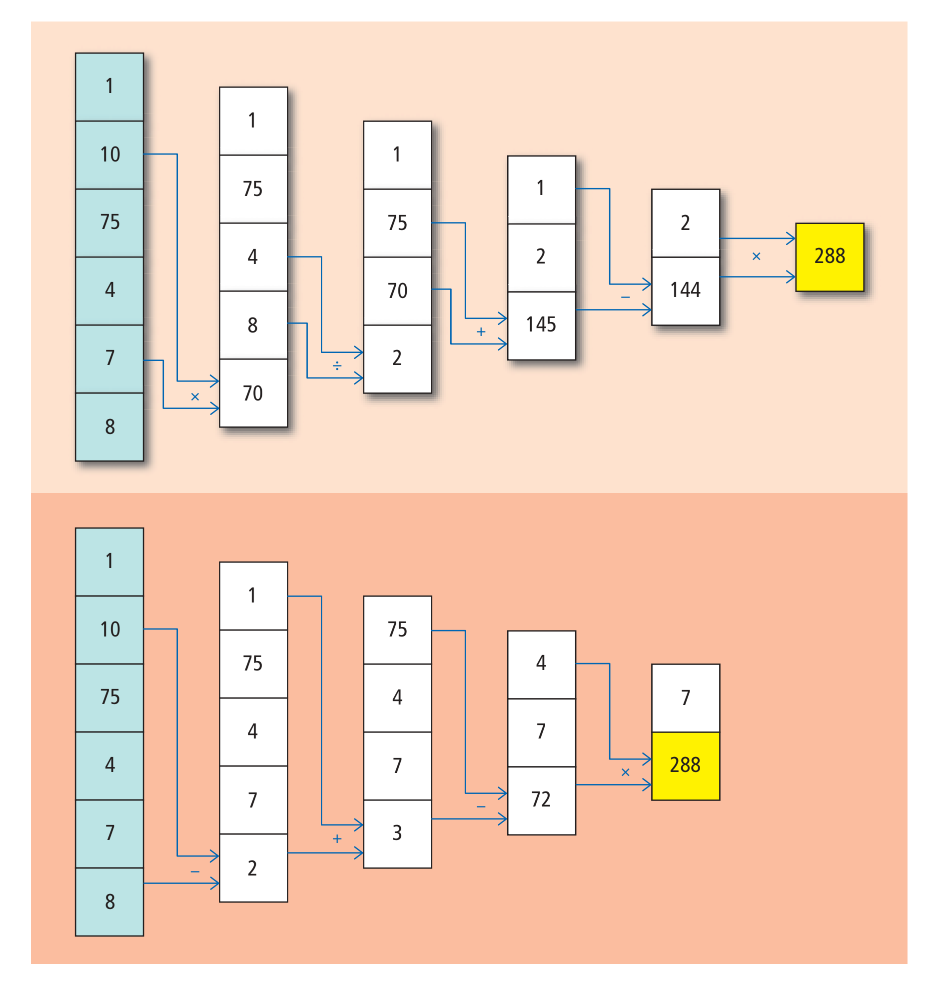
Reina ha incluido también en su algoritmo algunos trucos que lo aceleran,

como empezar siempre operando con los números mayores o guardar combinaciones de cuatro números y evitar explorar ramas idénticas del árbol. En la página web pedroreina.net, hay una versión del programa en línea, que tarda pocos segundos, aun cuando se introduzcan números que no tienen solución exacta, situación en la que la exploración debe recorrer todo el árbol de posibilidades.

El programa de Reina no imita el modo como razonamos los humanos. Ante el problema de las cifras, creo que la gente utiliza en paralelo dos estrategias. En una de ellas tratamos de aproximarnos primero de forma "gruesa" al objetivo, combinando los números iniciales grandes y utilizando sobre todo multiplicaciones, para luego afinar la aproximación con los números pequeños mediante sumas y restas. Por ejemplo, en el caso que se ilustra, multiplicaríamos 75 × 4 = = 300 y luego trataríamos de conseguir un 22 mediante combinaciones con el resto de los números. Esta estrategia no conduce, aquí, a la solución exacta.

La segunda estrategia, más elaborada, consiste en descomponer en factores el número objetivo y tratar de construir dichos factores. Por ejemplo, 288 es 72 × 4 y el 72 es relativamente fácil de obtener a partir de los números iniciales. Observen que cada estrategia sitúa al principio o al final la multiplicación, que es una operación clave en todo el juego, ya que posee un mayor abanico de resultados.

Programar estas estrategias es muy complicado, porque no podemos formularlas con precisión y en ellas interviene en buena medida la intuición. Es como si recorriéramos el árbol de posibilidades de forma un tanto errática, comenzando a veces por el final y otras por el principio, descartando ramas por pura sospecha y adentrándonos con profundidad en otras que nos parecen prometedoras. Esta exploración tan "humana" supone un reto para la inteligencia artificial. En el problema de las "Cifras", la exploración exhaustiva es posible, pero en otros más complejos la máquina sigue estando por detrás de la mente. Lograr algoritmos de exploración que remeden la intuición del ser humano sigue siendo uno de los principales retos de la inteligencia artificial.



Dos posibles soluciones de un problema de "Cifras", en el esquema de árbol de Pedro Reina. En el segundo caso, se llega al número deseado sólo en cuatro pasos.

Reina ha diseñado también un algoritmo capaz de resolver la prueba de las "Letras". El problema es muy simple: se dan nueve letras y los concursantes han de generar con ellas la palabra más larga posible.

La solución que nos ofrece Reina es muy sencilla, gracias a una idea sumamente ingeniosa que el propio autor atribuye al profesor de inteligencia artificial Antonio Salmerón. Al escribir el programa, toma primero todas las palabras del diccionario de la Real Academia y ordena alfabéticamente las letras de cada palabra. Por ejemplo, "nutritivo" se convierte en "iinorttuv". Agrupa entonces estos anagramas según su longitud, los ordena alfabéticamente y los guarda en nueve ficheros: uno para los anagramas de nueve letras, otro para los de ocho, y así sucesivamente. Esta ordenación de las palabras del diccionario es la clave para encontrar la solución al problema.

Cuando nos dan las nueve letras con las que construir una palabra, el algoritmo las ordena alfabéticamente y busca en el fichero de anagramas de nueve letras. La búsqueda es muy rápida porque los anagramas están ordenados alfabéticamente. Si no encuentra la solución, elimina una de las letras y busca en el fichero de anagramas de ocho letras. Tiene que probar eliminando todas las letras, lo que da lugar a 9 posibilidades. Si no encuentra la solución, procede a eliminar dos letras y así sucesivamente. Como vemos, la idea de guardar las palabras del diccionario en forma de anagramas es clave para no tener que probar permutaciones de letras. Con ello se consigue un algoritmo bastante rápido y exhaustivo, como se puede comprobar en la página web de Reina.

En este caso, la solución dada, a pesar de su ingenio, no tiene nada que ver con el razonamiento humano. La forma en que las personas resolvemos este problema es aún más compleja que en el caso de las "Cifras" y utiliza una capacidad genuinamente humana: el uso del lenguaje. Y son precisamente los procesos cognitivos relacionados con el lenguaje natural los que suponen un mayor desafío en el campo de la inteligencia artificial.

Pantalla azul

Créaselo

Mark Fischetti

El público sabe que un actor no puede balancearse como una araña desde lo alto de un rascacielos ni charlar animadamente con un conejo, pero los técnicos en efectos especiales hacen creíbles tales escenas. Se sirven para ello del proceso de composición de imágenes (“matte”) que suele conocerse como de pantalla azul o de pantalla verde en el cine, y llave de color en televisión.

Usado por primera vez a finales de los años treinta del siglo pasado, ese método se mantuvo sin cambios durante decenios. Se filmaba una escena con el actor delante de una cortina o una pared azul o verde; se filmaba luego en otro lugar el fondo deseado. Los técnicos enmascaraban el color de la cortina o pared, sacaban transparencias positivas y negativas, superponían físicamente las cintas y las proyectaban sobre filme virgen, obteniendo así la composición final. Era un ejercicio de “impresión óptica” tedioso y caro, pero efectivo. Posteriormente se desarrolló otro método para las emisiones televisivas.

El telón de fondo podría ser de cualquier color. Sin embargo, dado que el rojo, el verde y el azul corresponden a los de las tres capas de emulsión de los filmes y los tres de las cámaras de televisión en color, son los colores más fáciles de filtrar. Aun así, el rojo suele evitarse, dado que, al estar presente en los matices cromáticos de la piel, su enmascaramiento altera el aspecto de las personas.

Hasta mediado el decenio de los noventa no empezó a tomar el relevo un proceso totalmente computarizado. El programa informático convertía los fotogramas en archivos digitales y facilitaba su manipulación. Era una técnica más rápida, más barata y más refinada. Los técnicos no tardaron en adoptarla. Hoy la mayoría de los largometrajes se montan digitalmente.

Pero la edición final requiere todavía la intervención del personal técnico: ajustan sombras, corrigen colores y afinan

¿SABIA USTED QUE...?

➤ **ANTES Y AHORA:** Los cinéfilos que quieran ver el modo en que la informática ha mejorado la composición de imágenes pueden comparar la versión original de *La Guerra de las Galaxias: El Imperio Contraataca* (1980) con la versión en DVD de 2004, realizada con técnicas más refinadas; ambas se incluyen en la edición limitada del filme de 2006. La versión en HD DVD de *300* incluye un documental extra acerca del trabajo ejecutado por el método de pantalla azul.

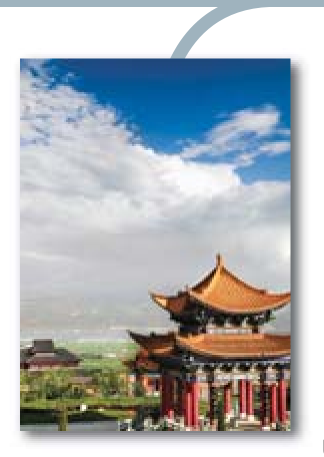
➤ **TESTIGOS:** A veces los programas informáticos tienen dificultades para encajar con nitidez fondos complicados detrás de un actor que se mueve rápidamente de un lado a otro de una pantalla azul o verde. En ocasiones, los técnicos pegan pelotas de tenis o círculos claros sobre un patrón colocado sobre la pantalla para que actúen a modo de “testigos” o marcas de referencia que ayuden a los montadores a afinar el seguimiento. Esas señales de color deben también enmascararse. Se trata de un truco empleado a gran escala en *Space Jam*, una divertida comedia de 1996 sobre el baloncesto, protagonizada por Michael Jordan y Bugs Bunny.



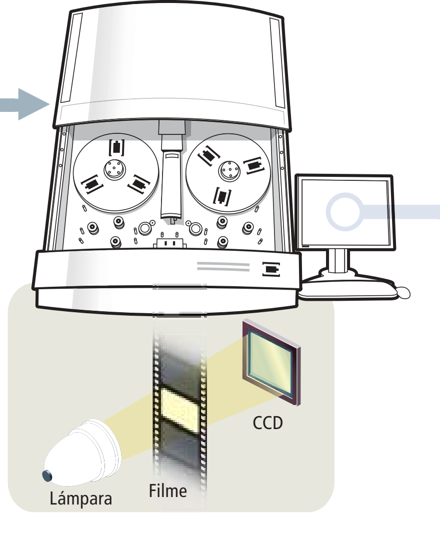
FILME



En el plató se filma en 35 milímetros el salto del actor sobre una pantalla azul o verde.



Se filma un fondo real.



Un escáner CCD* o TRC** digitaliza uno a uno los fotogramas del actor y almacena esa información en la unidad de disco duro de un ordenador. Se procede igual con la toma para el fondo.

* CCD: Dispositivo de acoplamiento de carga
** TRC: Tubo de rayos catódicos

➤ EN EL ORDENADOR



Un programa de montaje sustituye la longitud de onda azul por color blanco.

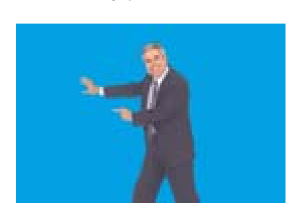
BLACK 100 *Getty Images (figura saltando)*; JOSON *Getty Images (imagen del fondo)*; 5W INFOGRAPHICS *(CCD y TRC)*

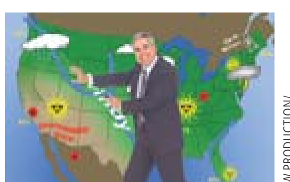
contornos para evitar que los espectadores perciban apariciones o artefactos fugaces. Pese a los avances técnicos, el proceso es todavía una cuestión de arte; necesita del toque humano.

A partir de su éxito en los grandes estudios, se han desarrollado programas de composición de imágenes más sencillos para su incorporación a los aparatos de vídeo doméstico. Por botón de muestra: Final Cut 6 y Avid Xpress, que se han ido refinando. Según Walter Graff, director y cineasta, viene a ser como tener un sistema de montaje y efectos especiales de 20.000 euros en un paquete informático de 800 euros; lo que no quiere decir que un aficionado no pueda poseer ojo y habilidad para aprovechar ese paquete como un profesional.

TELEVISION

Una cámara envía la imagen de un meteorólogo a un ordenador. La aplicación "llave de color" le sustrae la longitud de onda azul, que se convierte en un agujero transparente. En su lugar, se inserta una segunda entrada de gráficos, como puede ser un mapa. Si el hombre del tiempo viste una corbata azul de una longitud de onda parecida, los telespectadores verán un agujero en su lugar. Se emplea la misma técnica para insertar videoimágenes detrás de los locutores y presentadores.



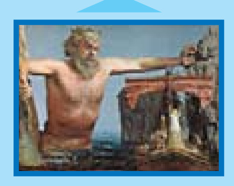


SW PRODUCTION/ BRAND X/CORBIS

PANTALLAS AZULES DESTACADAS

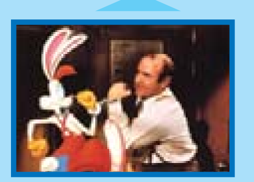
1940 *El ladrón de Bagdad*, primera aplicación manual de la técnica de pantalla azul

1963 *Jasón y los Argonautas*, refinada combinación de actores humanos y animación fotograma a fotograma



1980 *La Guerra de las Galaxias: El Imperio contraataca*, automatización del proceso de pantalla azul mediante mini-ordenadores

1988 *¿Quién engañó a Roger Rabbit?* combinaba actores humanos y personajes de animación creados por ordenador



1995 *Alerta máxima II*, filmada en un plató totalmente verde, con lo que las cámaras podían rodar desde ángulos distintos



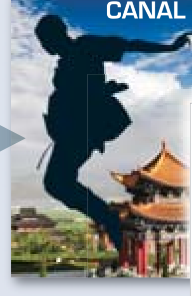
2000 *O brother!*, uno de los primeros filmes de Hollywood producidos digitalmente de principio a fin, aunque con pocos efectos especiales

2006 *300*, nuevos adelantos en la mezcla de actores humanos, personajes creados por ordenador y fondos

EVERETT COLLECTION (*arriba*); BUENA VISTA/EVERETT COLLECTION (*centro*); © WARNER BROS./EVERETT COLLECTION (*abajo*)



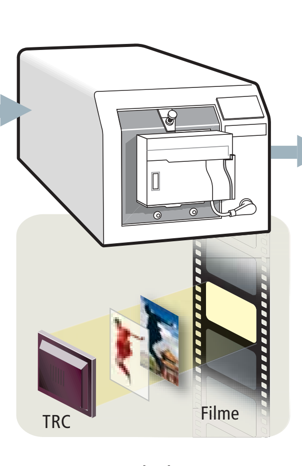
Define luego en negro la imagen que queda. Para contornear el actor, el programa busca los cambios nítidos de luminancia, el límite entre blanco y negro.



El programa sustituye el fondo blanco por el nuevo fondo, grabado en un archivo o canal digital.



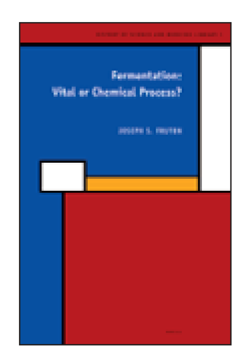
El programa añade en un segundo canal la imagen en color que se desea superponer.



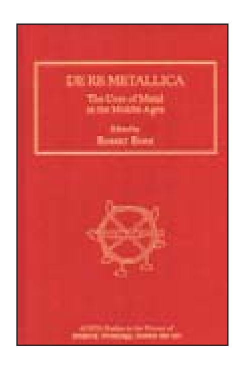
Un TRC instalado en una videograbadora proyecta ambas imágenes a la vez sobre un filme virgen de 35 milímetros.



Escena final: el proceso se repite para cada fotograma de la actuación del actor en el plató.



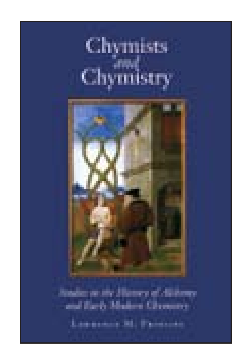
FERMENTATION. VITAL OR CHEMICAL PROCESS?,
por Joseph S. Fruton. Brill; Leiden, 2006.



DE RE METALLICA. THE USES OF METAL IN THE MIDDLE AGES,
dirigido por Robert Bork. Ashgate; Aldershot, 2005.



ALCHEMY AND AUTHORITY IN THE HOLY ROMAN EMPIRE,
por Tara Nummedal. The University of Chicago Press; Chicago, 2007.



CHYMISTS AND CHYMISTRY. STUDIES IN THE HISTORY OF ALCHEMY AND EARLY MODERN CHEMISTRY,
por Lawrence M. Principe. Chemical Heritage Foundation-Science History Publications; Sagamore Beach, 2007.

Fermentación

Concepto clave de la química moderna, nació del núcleo de la alquimia

El conocimiento empírico de la fermentación nació con la agricultura. En tiempos prehoméricos se dominó ya la conversión del mosto en vino, con efervescencia. En su expansión mediterránea los griegos introdujeron la viticultura en la Galia meridional hacia 600 a.C. A ese proceso le llamaron *zymotechnia*. Una efervescencia similar se observó en la antigua Mesopotamia con la acción de la levadura sobre una masa cereal ablandada o en la manufactura de la cerveza (*Fermentation: Vital or Chemical Process?*).

Su estudio hubo de esperar al advenimiento de los *Meteorológicos* de Aristóteles. La violenta efervescencia asociada a la vinificación aportaba analogías para la experiencia diaria y permitía dar cuenta de otros cambios experimentados por la materia (así, la germinación de las semillas o la generación de los metales). En los *Meteorológicos*, se definía la concocción (*pepsis*) en términos de dos opuestos activos, caliente y frío, y dos pasivos, húmedo y seco. Aristóteles tomó el término *pepsis* de los escritos hipocráticos sobre la digestión humana y de Empédocles, el concepto de opuestos. Generalizó el concepto de *pepsis* para incluir la maduración del fruto, el desarrollo de un embrión y la generación espontánea.

Alejandría acunó la alquimia occidental con Zósimo, en torno 300 d.C. Este autor amasó la tradición aristotélica con el neoplatonismo en un compendio que ponía el énfasis en el *pneuma* de los estoicos y el misticismo arcano de Hermes Trismegisto, la Cábala y Zoroastro. Los protoalquimistas alejandrinos, que consideraban que el color y otras propiedades de un metal revelaban su espíritu interno, fabricaron los primeros aparatos de destilación con condensadores; con ello permitieron la separación del "pneuma" (espíritu) de los "somata" (cuerpos) contaminadores. El refinamiento de los métodos de destilación condujo a la producción de alcohol etílico (*aqua ardens, aqua vitae*) a partir de vino. El objetivo último habría de ser, con todo, la conversión de plomo u otros metales en oro.

El conocimiento químico y los métodos experimentales adoptados por los alquimistas islámicos derivaban de los artesanos alejandrinos. Asimilaron a Dioscórides. Y los traductores sirios vertieron el saber griego al árabe entre 750 y 900. Jabir ibn Hayyam (fl. ca. 900) aceptó la doctrina aristotélica de los opuestos y defendió que la transmutación de los elementos sólo era posible si concurría un equilibrio de las "cualidades". Afirmaba que los metales estaban compuestos de "azufre" y "mercurio"; pensó que el oro, el más perfecto de los metales, constituía una combinación de sus formas puras. Parece que llego al conocimiento del amonio. A Jabir le sucedió Abu Bakr Muhammad ibn Zkariyya al-Razi, defensor de la transmutación. Pero sólo Abdallah ibn Sina (980-1037) profundizó en el conocimiento de los *Meteorologicos*. Los alquimistas musulmanes destilaron todo mineral o sustancia animal disponible; la aplicación de un fuego lento elevaba un "espíritu" vaporoso que, por condensación, se convertía en líquido (un "agua"), en tanto que un fuego intenso elevaba un fluido aceitoso e inflamable, y dejaba en el alambique un residuo seco fijo, vale decir, una "tierra" o "sal".

Del árabe al latín trasladaron los textos alquímicos Robert de Chester, Adelardo de Bath, Vincent de Beauvais y sobre todo Gerardo de Cremona. Y entró con fuerza el concepto de "fermento". En su tratado sobre minerales y metales, Alberto Magno subrayaba que su potencia ínsita "procedía a través de los elementos y la fermentación". De forma inequívoca Roger Bacon exponía en su *Espejo de alquimia*: "lo mismo que en la panificación un poco de levadura nutre y fermenta una gran cantidad de pasta, así ocurre con el fermento de la piedra, que puede multiplicar el mineral." De especial interés en el siglo XIV fue la obra *Pretiosa margarita novella*, de Petrus Bonus de

Ferrara, que considera la fermentación "el gran secreto de nuestro arte y sin cuyo dominio no puede alcanzarse su objetivo". Un siglo después, George Ripley compuso un *Tratado de alquimia* donde aparecen las doce "puertas" que debían traspasarse en el proceso químico: calcinación, solución, separación, conjunción, putrefacción, congelación, cebado, sublimación, fermentación, exaltación, multiplicación y proyección.

Al valor intrínseco de la metalurgia medieval debe sumársele su función de puente entre la antigüedad y la modernidad. El prestigio de la metalurgia se elevó a cotas muy altas en la cultura altomedieval cuando produjo un amplio repertorio de artefactos sacros y civiles (*De re metallica. The uses of metal in the Middle Ages*). Armas y armaduras, relicarios, monedas, cañerías y herramientas de toda clase dan fe del refinamiento alcanzado. Versiones precoces de la aguja magnética se introdujeron en la navegación mediterránea hacia el siglo XIII. Pero las propiedades de los metales fueron descubriéndose de una manera paulatina. Por una razón obvia: los metales no suelen darse puros en la naturaleza, sino que en su mayoría se encuentran químicamente enlazados con elementos no metálicos, tales como el oxígeno, el azufre y el carbono, formando menas. Puesto que el calentamiento ha constituido el método más típico de liberar metales de una mena, la industria ha venido conformándose estrechamente por la variabilidad en los puntos de fusión. Estaño, plomo y zinc, con puntos de fusión de 232, 327 y 419 grados C, respectivamente, pueden aislarse con relativa facilidad incluso en un horno rudimentario. La plata, el oro y el cobre, sin embargo, funden a 961, 1063 y 1083 grados C, respectivamente, pero el hierro no funde hasta 1535 grados C.

El desarrollo bajomedieval y renacentista de las artes de la minería y la mineralogía propició la invención de nuevos hornos y alambiques. Se buscó con ahínco un método que implicara la fermentación para la creación de un elixir que permitiera la transformación de plomo en oro.

A principios del siglo XVI, emerge la figura de Theophrastus Bombastus de Hoenheim ("Paracelso"), controvertida en el ámbito de la química y cuya principal contribución fue rechazar la teoría humoral de Galeno. Partidario acérrimo de la medicación con metales (oro, antimonio, mercurio), abogaba por tres principios derivados del pensamiento hermético y cabalístico: "sal", "azufre" y "mercurio". Suya es también la idea de que el metabolismo corría a cargo del *archaeus*. Cuando Paracelso habla de *Scheidung* (separación) de los tres principios aludidos por medio del análisis del fuego, lo que viene a designar es una nueva creación de las tres sustancias a partir de un sustrato homogéneo y unificado, más que un aislamiento de los tres ingredientes preexistentes.

Otra extensión contemporánea de la metalurgia fue la cosmética. Se publican numerosos manuales de secretos, inspirados en prácticas alquimistas. *Les secrets du Signeur Alexis le Piémontains*, aparecida en 1555, constituye un testimonio emblemático. Sus fórmulas subrayan los lazos que unen metales, alquimia y cosméticos. Con todo, la frontera entre los productos destinados a resaltar la belleza y los destinados a ejercer una acción terapéutica resulta harto borrosa, pues la prevalencia concedida a los síntomas visibles en la detección de las enfermedades inclina a considerar que la belleza constituye el testimonio irrefutable de buena salud. El caso del mercurio o plata viva nos habla de esa interconexión. El mercurio con fines terapéuticos entra en la composición de pomadas y ungüentos; con fines cosméticos, en el *calomel*, unos polvos blancos de cloruro de mercurio obtenido por sublimación.

Los iatroquímicos, médicos de extracción paracelsista, comparaban el curso de las enfermedades con el desarrollo de minerales. Encontraron un protector de excepción en el rey Enrique IV (*Chymists and Chymistry. Studies in the History of Alchemy and Early Modern Chemistry*), cuyo espíritu pragmático se refleja en su interés por la agricultura y la minería. El monarca apoyó a Jean Ribit de la Rivière, Joseph Du Chesne y Théodore Turquet de Mayerne, sus médicos personales, en la controversia que mantuvieron contra la facultad de medicina de la Sorbona en los años de 1603 a 1608. Disputa que Du Chesne aprovechó para vindicar la medicina hermética contra la academia. No dudó en defenderse aportando la prueba experimental de la palingénesis, es decir, la resurrección de una planta a partir de sus cenizas. En 1604, Du Chesne dedicó un capítulo entero de su libro *Ad veritatem Hermaticae medicinae* a esta cuestión, presentando ambas como un logro de la alquimia y una prueba de la resurrección de los cuerpos en el día del Juicio.

En realidad la alquimia empapa la vida de una Europa en efervescencia ella misma (*Alchemy and Authority in the Holy Roman Empire*), en la que convergen un arte antiguo y esotérico, una práctica empresarial, un conjunto de técnicas y un símbolo del engaño y el fraude. En 1601



El cáliz de Ardagh. (Cortesía del Museo Nacional de Irlanda.)

un alquimista suizo ciego, Hans Heinrich Nüschler, recordaba su triste ventura alquimista en la corte del duque Friedrich de Wüttenberg: “Hace dos años, rememoraba, cuando yo trabajaba en la alquimia en diversos lugares de mi país… me convencí que debía viajar hasta su corte y exponerle mi trabajo ante su consideración… puse mi arte a su disposición sin cobrar hasta que usted comprobara mi dominio del mismo”. El alquimista y su patrón firmaron un contrato donde se especificaba que Nüschler recibiría 20.000 táleros una vez se demostrara funcional su proceso de extracción de 4 loth (unos 60 gramos) de oro a partir de 1 marco (unos 235 gramos) de plata. Tras la firma, Nüschler entregó al duque una copia del proceso para que cualquier operario del laboratorio de palacio pudiera intentarlo, sufragando Nüschler las costas. Tras innumerables fracasos y una deuda insaldable, el alquimista acudió al fraude: añadir subrepticiamente una pequeña cantidad de oro en la amalgama. Descubierto, fue condenado a muerte. En los tribunales de justicia, el fraude alquimista tenía un significado muy preciso y estaba bien tipificado.

Urgía distinguir entre un buen y un mal alquimista. Leonhard Thurneisser, Heinrich Khunrath y Michael Maier se aprestaron a develar los trucos de los falsarios. Entre los antagonistas de Paracelso y de los paracelsistas sobresalió Andreas Libavius, autor de uno de los primeros libros de química, *Alchimia* (1597). Libavius se adhirió a la teoría de la transmutación de los metales. Definía la fermentación como “la exaltación de un material en su parte esencial por medio de un fermento que, en virtud de su naturaleza espiritual, penetra la masa entera y la convierte en su propia naturaleza”. El fermento opera principalmente en virtud de su calor interno. Respetuoso con los clásicos, refinado en el uso del lenguaje y hábil experimentalista, elevó el estatuto cognitivo de la *chymia* y facilitó su divulgación. Además de la *Alchemia*, Libavius escribió *Novus de medicina veterum tam Hippocratica, quam Hermetica tractatus* (1599) y *Liber hypomnematum, qui est apocalypseos Hermeticae* (1613), sobre química hermética y medicina.

Libavius fundió temas aristotélicos, místicos y herméticos en su exposición sobre las cualidades ocultas. Incluyó entre las metáforas de interés alquímico los emblemas, jeroglíficos y otros enigmas de cuño hermético que los químicos podrían desentrañar... si tuvieran el talento de Dédalo, el hilo de Ariadna y la rama dorada de Eneas. Sin embargo, convenciéndose a sí mismo de que debía atreverse y, sabedor de que la fortuna bendice a los decididos, se atrevió con una interpretación propia de la *Tabla esmeralda* de Hermes Trismegisto. Un texto de proporciones reducidas, que nos ha llegado en al menos dos recensiones árabes, el *Kitab Ustuqus al-uss at-tani* (*Segundo libro de los elementos de fundación*), atribuido a Jabir ibn Hayyan, y el *Kitab Sirr al-haliqa* (*Libro del secreto de la creación*), asignado a Apolonio de Tyana, que sería traducido al latín por Hugo de Santalla, Felipe de Trípoli y Platón de Tívoli en el curso de los siglos XII y XIII. Denominada la *prima materia verbalis* de la alquimia, la *Tabula smaragdina*, sus textos enigmáticos atraviesan la literatura alquímica y actúan como catalizadoras de las especulaciones plurales sobre el arte alquimista.

La corriente paracelsista, sin embargo, retomó nuevo brío con Joan Baptista van Helmont y Daniel Sennert. Este defendió una teoría corpuscular de la materia y aportó pruebas experimentales de que las fermentaciones naturales y artificiales implicaban la separación de los cuerpos en sus partes componentes. Van Helmont descubrió un “spiritus sylvestris”, que denominó “gas” durante la fermentación del vino. Influido por la alquimia corpuscular de Geber, distinguía los procesos químicos entre partículas gruesas de los que ocurrían entre partículas sutiles. Desdeñaba a quienes se atenían a la “química vulgar” del nivel “grueso” de la interacción corpuscular y no alcanzaban los *arcana maiora* (grandes secretos) tales como el alkagesto o las medicinas universales descritas por Paracelso. Ideó el famoso experimento del sauce como prueba de que el agua constituía el principio último de la naturaleza.

Helmontiano crítico, Robert Boyle estableció la relación cuantitativa presión-volumen (ley de Boyle) por medio de una bomba de aire. En *Sceptical Chymist*, publicado en 1661, criticaba la química contemporánea. Le recriminaba sus vicios lingüísticos y la ausencia de claridad, de expresión inequívoca. Boyle se mostraba particularmente acerado en su crítica contra la falta de coherencia en la denominación de las sustancias. La enseñanza de los principios de la naturaleza no admite expresiones equívocas. Su trabajo más importante corresponde al dominio de la química analítica, en particular los ensayos de color (*Experiments and Considerations Touching Colours*). Bajo la tutela de George Starkey, confiaba en que el “mercurio incandescente” (amalgama de mercurio y oro formado con la liberación de calor) aportaría los medios para la transmutación de los metales. El propio Isaac Newton escribió un opúsculo, *De compositione acidorum*, donde exponía su tesis sobre la fermentación en el marco de la atracción de las partículas de materia.

La primera anotación que se conoce de Antoine Lavoisier sobre el proceso de la fermentación aparece en su cuaderno de laboratorio con fecha de 20 de febrero de 1773.

Sus ensayos con la levadura incoaron la nueva química que se va jalonando con Dalton, Gay-Lussac y Berzelius, quienes desarrollaron los conceptos de valencia, estructura y configuración que llevó, a finales del siglo XIX, hasta la síntesis por Fischer de azúcares y su demostración de la especificidad estereoquímica de la acción fermentativa. En el intervalo, se fueron descubriendo una serie de fermentos (pepsina, distasa), al tiempo que Berzelius y Liebig propusieron teorías químicas del proceso en cuestión, planteamiento que tuvo en Pasteur su antagonista con su enfoque vitalista de la fermentación de la levadura.

En 1897 se difunde el informe de Büchner sobre la preparación, a partir de la levadura de la cerveza, de un extracto acuoso (“zymasa”) que fermentaba glucosa para producir etanol y dióxido de carbono. El estudio experimental de la acción de la zymasa antes de la Primera Guerra Mundial por Harden, Wroblewski, Ivanov y otros reveló que la fermentación de la levadura constituía un proceso químico de múltiples etapas con intervención de enzimas diversas y la formación intermedia de derivados fosfato de la glucosa, fructosa y ácido glicérico. La resolución del problema de la fermentación de la levadura no llegaría hasta el decenio de 1930, con la sustitución del metilglioxal por ácido pirúvico como un intermediario clave, y la demostración de que la vía de la conversión de glucosa en ácido pirúvico es la misma que la degradación anaeróbica de la glucosa en el músculo de mamífero.

—*Luis Alonso*

EN EL PROXIMO NUMERO DE MAYO 2008

El final de la cosmología,

por Lawrence M. Krauss y Robert J. Scherrer

La aceleración de la expansión cósmica borra las huellas del origen del universo.

DON DIXON

El atún rojo en peligro,

por Richard Ellis

Quizá la única manera de salvar al atún rojo, uno de los peces más maravillosos y amenazados del océano, sea domesticar la especie.



Límites de la computación cuántica,

por Scott Aaronson

Los ordenadores cuánticos serían extraordinariamente veloces en determinadas tareas concretas, en el resto descollarían modestamente sobre los ordenadores de hoy. Ello pudiera conducir a un nuevo principio físico fundamental.



Cultos funerarios mayas,

por Vera Tiesler

Los mayas actuales conservan ritos funerarios de una cultura milenaria basada en la continuidad cíclica entre la vida y la muerte, la creación y la destrucción.

Sustancia blanca y cognición,

por R. Douglas Fields

La sustancia blanca del cerebro se consideraba soporte pasivo de la actividad neuronal. La investigación reciente demuestra que interviene en el aprendizaje y en la enfermedad mental.

